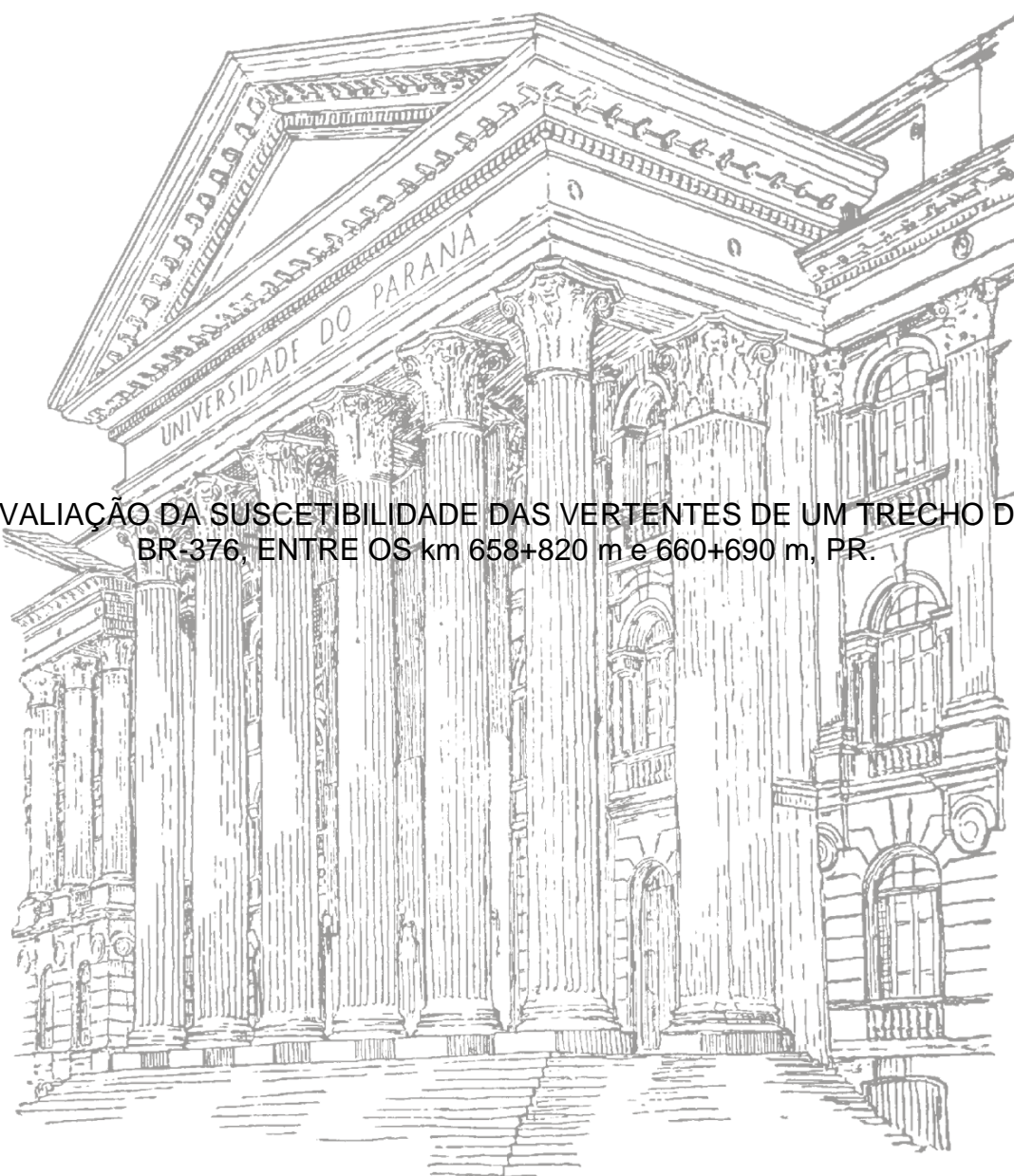


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

YULIMAR SUGEY MILLAN COY

AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DAS VERTENTES DE UM TRECHO DA
BR-376, ENTRE OS km 658+820 m e 660+690 m, PR.



CURITIBA
2015

YULIMAR SUGEY MILLAN COY

AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DAS VERTENTES DE UM TRECHO DA
BR-376, ENTRE OS km 658+820 m e 660+690 m, PR.

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Geologia, no
curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de
Ciências da Terra, Universidade Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pio Fiori
Co-orientador: Prof. Dr. Claudinei T. da Silveira

CURITIBA
2015

M645a

Millan Coy, Yulimar Sugey

Avaliação da suscetibilidade das vertentes de um trecho da BR-376, entre os km 658+820m e 660+690m, PR/ Yulimar Sugey Millan Coy. – Curitiba, 2015.

101 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2015.

Orientador: Alberto Pio Fiori – Co-orientador: Claudinei T. da Silveira.
Bibliografia: p. 96-101.

1. Escorregamentos (Geologia). 2. Encostas. 3. Solos - Estabilidade - Modelos matemáticos. 4. Sistemas de Informação Geográfica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Fiori, Alberto Pio. III. Silveira, Claudinei T. da . IV. Título.

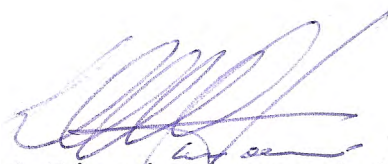
CDD: 551.307

TERMO DE APROVAÇÃO

YULIMAR SUGEY MILLAN COY

“Avaliação da suscetibilidade das vertentes de um trecho da BR-376, entre os km 658+820 m e km 660+690 m, PR.”

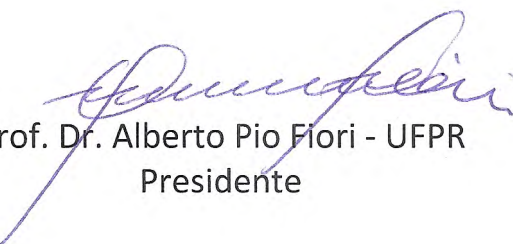
Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná. Comissão formada por:



Prof. Dr. Luiz Eduardo Mantovani - UFPR



Prof. Dr. André Nagalli - UTFPR



Prof. Dr. Alberto Pio Fiori - UFPR
Presidente

Curitiba, 25 de março de 2015.

*A meus pais, Ramona e Pedro,
pelo amor e apoio sempre proporcionado,
tudo o que eu faço é por e para vocês.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a deus pela vida, por abençoar meus dias, por colocar no meu caminho só pessoas maravilhosas e por me proteger a mim e a minha família em cada meta proposta.

Aos meus orientadores o Prof. Dr. Alberto Pio Fiori e o Prof. Dr. Claudinei Taborda pela orientação, paciência e confiança, sempre dispostos a me ajudar e ensinar e pelos que tenho grande carinho e admiração.

Ao corpo docente da Pós Graduação do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de desenvolver a minha pesquisa.

A CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa que me foi outorgada ao longo do mestrado.

Ao pessoal do núcleo de geoprocessamento, em especial as meninas Priscila D'Arroz, Thammy Mottin e Gisele Neuman pela ajuda no manejo do programa, pelo parceria, disponibilidade e carinho, com a ajuda de vocês foi muito mais fácil fechar com sucesso meu trabalho, muito obrigado mesmo.

A minha família que são a minha maior inspiração e pelos que tento ser cada dia uma melhor pessoa, aos meus pais Pedro e Ramona por tudo o apoio e amor recebido em todas as fases da minha vida, eu amo tanto vocês. Aos meus irmãos, Franklin, Yuruany e Yuleidy, por sempre ser mais que irmãos meus melhores amigos. Aos meus sobrinhos Alexander, Camila, Andrea, Mathias e Jeremias pelos que sinto o mas grande e sincero amor, vocês alegram minha vida.

O meu enamorado, amigo e parceiro Andrés Miguel Gonzalez por sempre estar de meu lado e me apoiar e incentivar em cada meta planejada, obrigado meu amor.

Aos integrantes da família Dall'agnol Acevedo, Hector, Silvana, Helena, Daiane, Ligie, Andreize e Christian pelo recebimento na sua casa, por fazerem sentir uma integrante mais da família e pelo carinho de sempre, vocês são umas pessoas muito especiais no meu coração, obrigado por tudo.

A banca da defesa composta pelos professores doutores André Nagalli e Luis Eduardo Montovani pelas sugestões que serviram para melhorar o trabalho desenvolvido.

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a suscetibilidade das vertentes ante a ocorrência de escorregamentos translacionais. Uma grande variedade de métodos vem sendo propostos para compreender e avaliar a ocorrência destes processos na paisagem, entre eles, os métodos determinísticos baseados em modelos matemáticos são muitos utilizados. Estes modelos representam as características físicas do terreno e os processos envolvidos na análise da estabilidade por incluir parâmetros físicos, mecânicos, hidrológicos e morfológicos da área. No modelo preditivo empregado nesta pesquisa foi aplicada um método com enfoque quantitativo, utilizando os métodos determinísticos com base na teoria do equilíbrio-limite para o cálculo dos índices de segurança e espacialização dos resultados empregando técnicas de Sistema de Informações Geográficas (SIG). A área da pesquisa está localizada na porção paranaense do Planalto de Curitiba, a cerca de 50 km da capital, no trecho da rodovia BR-376 entre os quilômetros 658+820m e 660+690m, em uma área de 2 km² que abrange as pistas sul e norte no trecho São José dos Pinhais e Garuva. A escolha da área justificou-se pela quantidade de escorregamentos translacionais ocorridos nas vertentes naturais e pela quantidade de áreas com obras de estabilização observadas, como retaludamentos e cortinas atirantadas. Várias dessas movimentações ocorreram após eventos pluviométricos muito fortes que atingiram a região no mês de março de 2011, com precipitações acumulada mensal maior a 700 mm, os quais ocasionaram prejuízos e a interrupção total do tráfego no trecho da BR-376. A validação do modelo foi feita por meio do cruzamento do inventário das cicatrizes de escorregamentos, observadas em fotografias aéreas e imagens de satélite com os resultados obtidos nos mapas de fator de segurança (Fs), obtendo-se uma boa correspondência na localização das áreas com maior suscetibilidade ante a ocorrência de escorregamentos translacionais.

Palavras-Chave: Escorregamentos Translacionais, Suscetibilidade, Modelos matemáticos, Fator de segurança.

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the susceptibility of the slopes before the occurrence of translational landslides. A wide variety of methods have been proposed to understand and evaluate the occurrence of these processes in the landscape, including the deterministic methods, based on mathematical models which are frequently used. These models represents better the physical characteristics of the terrain and the processes involved in the stability analysis, by including physical, mechanical, morphological and hydrological parameters of the area. In the predictive model used in this research, it was applied a methodology with quantitative approach using deterministic methods, based on the limit equilibrium theory for calculating safety rates and spatial distribution of results, using Geographic Information System techniques (GIS). The study area is located in the Paraná portion of the Curitiba Plateau, about 50 km from the capital, in the stretch of the BR-376 highway between kilometers 658 + 820 and 660 + 690, in a 2 square kilometers area, covering the slopes south and north, between São Jose dos Pinhais and Garuva. The choice of the area was justified by the amount of translational landslides occurred in the natural slopes and the amount of areas with stabilization works observed, as slope embankments and tension-curtains. Several of these movements occurred after a strong rainfall event that hit the region in March 2011, with the highest monthly accumulated rainfall of 700 mm, which caused injury and total interruption of the traffic on the stretch of the BR-376. The model was validated by crossing the inventory of landslide scars, observed in aerial photographs and satellite image, with the results obtained in the safety factor maps (Fs), resulting in a 90% of correspondence on location areas with the higher prevalence of occurrence of translational landslides.

Keywords: Translational landslides, Susceptibility, Mathematical models, Safety factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Materiais utilizados na realização do trabalho.....	15
Figura 2. Localização da área de estudo.....	20
Figura 3. Aspecto dos topos alongados e aplanados no km 660 + 600.	21
Figura 4. Mapa Geológico da área de estudo com os dados da fotointerpretação. ..	23
Figura 5. Distribuição mensal média das chuvas em estações na BR-376, PR (2006- 2014).	24
Figura 6. Precipitação diária registrada nos quatro pontos de monitoramento.....	25
Figura 7. Aspecto da Floresta no km 659 + 100.....	26
Figura 8. Perfil esquemático dos principais tipos de vegetação entre a Planície Litorânea, a Serra do Mar e o Primeiro Planalto Paranaense.	26
Figura 9. Processo de rastejo.....	29
Figura 10. Processo de escorregamento rotacional.	30
Figura 11. Processo de escorregamento translacional.....	30
Figura 12. Processo de escorregamento em cunha.....	31
Figura 13. Processo da Queda.....	31
Figura 14. Esquema de corrida detrítica.....	32
Figura 15. Curvatura das vertentes.	37
Figura 16. Decomposição da força (P) em sua componente tangencial e normal, e a força de resistência (R).	43
Figura 17. Fluxo da água em uma vertente natural.....	44
Figura 18. Principais fatores da vegetação que influenciam na análise da estabilidade de vertentes e decomposição das forças atuantes.....	45
Figura 19. Metodologia empregada para gerar a base de dados digital em SIG.	48
Figura 20. a) Vista geral da ruptura em 15/03/2011 e b) Vista da trinca do topo da ruptura, no km 659+270.	49
Figura 21. Relação dos escorregamentos com as estruturas no Inventário de escorregamentos.....	50
Figura 22. Ilustração dos movimentos ocorridos no talude, no topo escorregamento translacional e na base erosão superficial.....	51

Figura 23. Vista do solo escorregado que invadiu e obstruiu a pista sul no km 660 + 400, da BR-376.	51
Figura 24. Localização dos eventos ocorridos.	52
Figura 25. a) Solo residual de migmatito/gnaiss; e b) detalhe da retirada da amostra indeformada na parede.	55
Figura 26. Solo residual de migmatito/gnaiss da amostra AI-04.	55
Figura 27. Contato entre o solo coluvionar e o residual na coleta das amostras AI-01 e AI-02.....	56
Figura 28. Localização dos pontos de sondagens e das amostras indeformadas	57
Figura 29. Etapas do processo de sedimentação	58
Figura 30. Peneiramentos separando os grãos finos e grossos.....	58
Figura 31. Curva granulométrica da amostra AI-01.....	59
Figura 32. Curva granulométrica da amostra AI-02.....	59
Figura 33. Curva granulométrica da amostra AI-03.....	59
Figura 34. Curva granulométrica da amostra AI-04.....	59
Figura 36. Ensaio de limite de plasticidade no aparelho de Casagrande.	61
Figura 37. Gráfico de Plasticidade de Arthur Casagrande para as amostras de solo em estudo.....	62
Figura 38. Gráfico de plasticidade de Casagrande.	62
Figura 38. a) Picnômetro com as amostras no ensaio de massa específica; b) Pesagem do picnômetro com as amostras	63
Figura 39. Perfil Geológico - Geotécnico do talude no km 659 + 270m - Pista sul....	66
Figura 40. Localização dos pontos de sondagens no talude, km 659+270m.	67
Figura 41. Na direita o talhado dos anéis e na esquerda a amostra AI- 02 montada na prensa.....	69
Figura 42. Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de estudo	73
Figura 43. Mapa de Declividade da área de estudo	75
Figura 44. Mapa de Perfil de Curvatura das vertentes na área de estudo	77
Figura 45. Mapa de Orientação das Vertentes.....	79
Figura 46. Mapa preliminar de solos	81
Figura 47. Mapa de Fator de Segurança – Solo Seco, baseado nos valores obtidos nas sondagens ($C=5$ kPa e $\phi= 26^\circ$).....	84

Figura 48. Mapa de Fator de Segurança — 30% de saturação baseado nos valores obtidos nas sondagens ($C=5$ kPa e $\phi= 26$).	85
Figura 49. Mapa de Fator de Segurança – Solo Seco baseado nos valores obtidos nas amostras indeformadas ($C=8$ kPa e $\phi= 32^{\circ}$).	86
Figura 50. Mapa de Fator de Segurança — 30% de saturação baseado nos valores obtidos nas amostras indeformadas ($C=8$ kPa e $\phi= 35$).	87
Figura 51. Relação da declividade com o mapa de fator de segurança (amostras indeformadas-30% saturação) na porção sudeste da área em estudo, faixa de domínio a escala 1:1.000.	89
Figura 52. Relação da Declividade com o Perfil de Curvatura na porção Sudeste da área em estudo, utilizando a base topográfica a escala 1:1.000.	90
Figura 53. Validação do Mapa de Fator de segurança – 30% de saturação (dados das sondagens) com o mapa de inventários de escorregamentos.	92
Figura 54. Validação do Mapa de Fator de segurança – 30 % de saturação (dados das amostras indeformadas) com o mapa de inventários de escorregamentos.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Localização dos instrumentos	25
Tabela 2. Classificação dos tipos de Movimentos de Massa.	28
Tabela 3. Principais tipos de movimentos de massa.....	28
Tabela 4. Fatores Deflagradores dos movimentos de massa.	33
Tabela 5. Características do perfil de encostas relacionadas a ocorrência de movimentos de massa gravitacionais.	36
Tabela 6. Escalas utilizadas para o mapeamento em estudos de escorregamentos	28
Tabela 7. Técnicas de análise dos dados em função da escala de mapas.	41
Tabela 8. Levantamento de dados para análise de zoneamento nos estudos de escorregamento.....	41
Tabela 9. Localização das amostras indeformadas	54
Tabela 10. Resultados da análise granulométrica.....	60
Tabela 11. Resultado do teor de umidade.....	60
Tabela 12. Resultados da análise dos limites de Atterberg.....	61
Tabela 13. Valores de p_{nat} e γ_{nat} das amostras indeformadas.....	63
Tabela 14. Resultados dos parâmetros de resistência no km 659+270m.	66
Tabela 15. Resultados dos parâmetros de resistência no km 659+270m.	67
Tabela 16. Resultados dos parâmetros de resistência do km 660+400m.	68
Tabela 17. Resultados dos parâmetros de resistência do km 660+570m.	68
Tabela 18. Resultados dos parâmetros de resistência.....	70
Tabela 19. Classificação do relevo de acordo com a declividade	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivos	14
1.3 Materiais e métodos	15
1.3.1. Dados disponíveis da área	17
1.3.2 Trabalhos de Campo	17
1.3.3 Trabalhos de Laboratório	18
1.3.4 Compilação de dados e confecção de mapas	19
2 ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	19
3 ASPECTOS TEÓRICOS	27
3.1 Movimentos de massa gravitacionais	27
3.2 Fatores condicionantes e desencadeantes de movimentos de massa em vertentes	32
3.2.1 Geologia	34
3.2.2 Geomorfologia	35
3.2.3 Água	37
3.2.4 Clima	38
3.2.5 Vegetação	38
3.2.6 Ação Antrópica	38
3.3 Métodos de mapeamento de áreas instáveis	38
3.4 Métodos de análise da estabilidade de vertentes	42
3.4.1 Determinação de forças em vertentes de extensão ilimitada, com percolação de água paralelamente à vertente.	44
3.5 Elaboração da base de dados em ambiente SIG	47
4. HISTÓRICO DOS MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS NA REGIÃO	48
5. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS	53
5.1 Descrições dos solos <i>in situ</i> e coleta de amostras indeformadas	53
5.2. Ensaios de laboratório	57
5.2.1 Ensaios de caracterização dos solos – Amostras indeformadas	57
5.2.2 Ensaios de cisalhamento direto	63
6. DISCUSSÕES E RESULTADOS	71
6.1 Processamentos dos parâmetros envolvidos na análise - confecção de mapas temáticos	71
6.1.1 Parâmetros topográficos	71

6.1.2 Parâmetros mecânicos.....	82
6.2 Aplicações do método para a determinação dos mapas de fator de segurança (Fs).....	82
6.3 Análises dos resultados.....	88
6.3.1 Validação do mapa de fator de segurança.....	91
7. CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa são alguns dos eventos naturais mais importantes que ocorrem no meio físico, à grande maioria deles associados a vertentes. De acordo com BISPO *et al.* (2011), esses eventos são desencadeados pela interação entre diferentes fatores endógenos, que envolvem características geológicas, pedológicas, geomorfológicas, além de fatores exógenos, como variáveis climáticas, fatores antrópicos, entre outros. Os movimentos provenientes dessas interações correspondem ao desprendimento e transporte de solo e/ou material rochoso vertente abaixo, devido à sua instabilidade condicionada pela gravidade, podendo ser intensificados pela ação de outros agentes, como a água ou vento (CHORLEY *et al.* 1984; FERNANDES e AMARAL, 1996; SESTINI, 1999). A água da chuva que infiltra e umedece o solo, aumenta o grau de saturação e a pressão dos poros, e reduz a resistência do solo devido à diminuição e/ou perda da coesão, contribuindo assim para a instabilização das vertentes.

O desprendimento e o transporte do material ocorrem em diferentes escalas e velocidades, variando desde rastejo até movimentos muito rápidos, como por exemplo, os escorregamentos (CHORLEY *et al.* 1984). Esses processos fazem parte da dinâmica natural da formação do modelado terrestre e podem tornar-se um problema quando são intensificados pela ocupação humana (SESTINI, 1999). Assim, a ocorrência de movimentos de massa intensifica a suscetibilidade de uma área, ou seja, fenômenos de origem natural ou induzidos antropicamente, acarretam prejuízos aos componentes do meio biofísico e social (ZUQUETTE *et al.* 1995).

O estudo sobre movimentos de massa pode ser feito através de diferentes abordagens, como por exemplo, uso de mapas de inventários, atributos estatísticos, métodos empíricos e métodos determinísticos. Entre esses, os métodos determinísticos são bastante empregados por aplicarem equações matemáticas sem englobar dados subjetivos (SAFAEI *et al.* 2011), a abordagem aplicada neste trabalho foi baseado nos métodos determinísticos.

FIORI e CARMIGNANI (2009) tratam de forma detalhada os diversos métodos determinísticos para o estudo da estabilidade, visando à determinação de um índice ou uma grandeza que permita quantificar o grau de estabilidade das vertentes aos

processos morfodinâmicos, como é o fator de segurança. A análise destes métodos, baseados na teoria de equilíbrio limite consideram que as forças que tendem a induzir a ruptura são exatamente balanceadas pelos esforços resistentes. A fim de comparar a estabilidade em condições diferentes de equilíbrio, é definido o Fator de Segurança (Fs).

Dada a importância dos estudos sobre a suscetibilidade a escorregamentos nas vertentes, neste trabalho é aplicada uma metodologia com enfoque quantitativo, baseada em métodos determinísticos para a espacialização das equações dos índices de segurança, por meio de Sistemas de Informação Geográficas (SIG), fornecendo uma documentação cartográfica muito útil, auxiliando na identificação das vertentes com maior suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos translacionais, de modo de tornar mais rápido e preciso a localização e diagnóstico das vertentes susceptíveis à ocorrência destes processos.

A área selecionada para este estudo é o trecho da BR-376 entre os quilômetros 658+820 m e 660+690 m, situado no município Tijucas do Sul, no Primeiro Planalto Paranaense. No mês de março do ano 2011 o trecho da rodovia em estudo foi acometido por vários episódios de escorregamentos essencialmente translacionais, a partir de eventos pluviométricos fortes (acumulação mensal > 700 mm), ocorridos em áreas de vertentes declivosas (> 20°) e solos rasos.

1.1 Justificativa

Os movimentos de massa são frequentemente responsáveis por consideráveis perdas humanas e econômicas em todo o mundo, cuja incidência aumenta com o desenvolvimento urbano e as mudanças de uso da terra.

Para controlar este efeito, é essencial determinar a suscetibilidade intrínseca da paisagem para antecipar seus modos de comportamento sob tensão, ante a ocorrência de eventos naturais, ou de intervenções humanas, que podem originar os movimentos de massa.

As zonas vulneráveis requerem uma adequada compreensão da estrutura e da paisagem da área, permitindo a identificação e zoneamento das áreas de instabilidade do terreno.

Atualmente um dos grandes problemas vivenciados pela população brasileira é a instabilidade de encostas, que vem provocando acidentes catastróficos colocando inclusive vidas em risco. Épocas chuvosas com elevado índice pluviométricas têm se tornado verdadeiros tormentos para a população, quando as encostas ficam mais suscetíveis a escorregamentos devido ao aumento do excesso de poro-pressão que reduz a resistência do solo ao cisalhamento.

Nas vertentes do Primeiro Planalto Paranaense diversas evidências de movimentações do terreno por escorregamentos translacionais são observadas, com uma dinâmica fortemente influenciada pela ação de precipitações e a declividade das vertentes. Tendo-se em conta que quando rodovias são implantadas nestes ambientes sujeitos a fenômenos de instabilização, torna-se importante realizar estudos que avaliem as condições de segurança ante a presença destes fatos, de modo tal de minimizar a ocorrência de movimentos de massa que podam colocar em risco tanto vidas humanas, como bens materiais.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliara suscetibilidade aos escorregamentos translacionais nas vertentes de um trecho da BR-376 entre São José dos Pinhais e Garuva, através da aplicação de modelos matemáticos de quantificação e espacialização para o cálculo do Fator de Segurança (F_s).

Como objetivos específicos destacam-se:

- Realizar o inventário das cicatrizes dos escorregamentos ocorridos na região através das fotografias aéreas, imagens de satélite e visitas de campo.
- Gerar mapas temáticos que permitam conhecer as características topográficas da área como, modelo digital do terreno, declividade, forma e orientação das vertentes, direção de fluxo e tipos de solos.
- Caracterização geotécnica dos solos que compreende o trecho da BR-376 em estudo, para conhecer suas propriedades físicas e mecânicas.

- Fotointerpretação geológica da área de estudo e cruzamento das informações armazenadas no banco de dados SIG (mapas temáticos), visando à geração de mapas de Fator de Segurança (Fs) da área de estudo.

1.3 Materiais e métodos

O fluxograma da Figura 1 descreve os materiais e métodos utilizados na execução do trabalho. Primeiramente foi feita a revisão e compilação de estudos geológicos – geotécnicos já existentes da área de estudo, tais como livros, teses, dissertações, artigos e relatórios de sondagens. Assim como consultas na internet e discussões com professores e pesquisadores, que contribuíram tanto na caracterização fisiográfica da área, como na compreensão dos tópicos relacionados às análises de estabilidade de vertentes, abordando desde as principais classificações de movimentos de massa até os métodos mais usados na análise de estabilidade de vertentes.

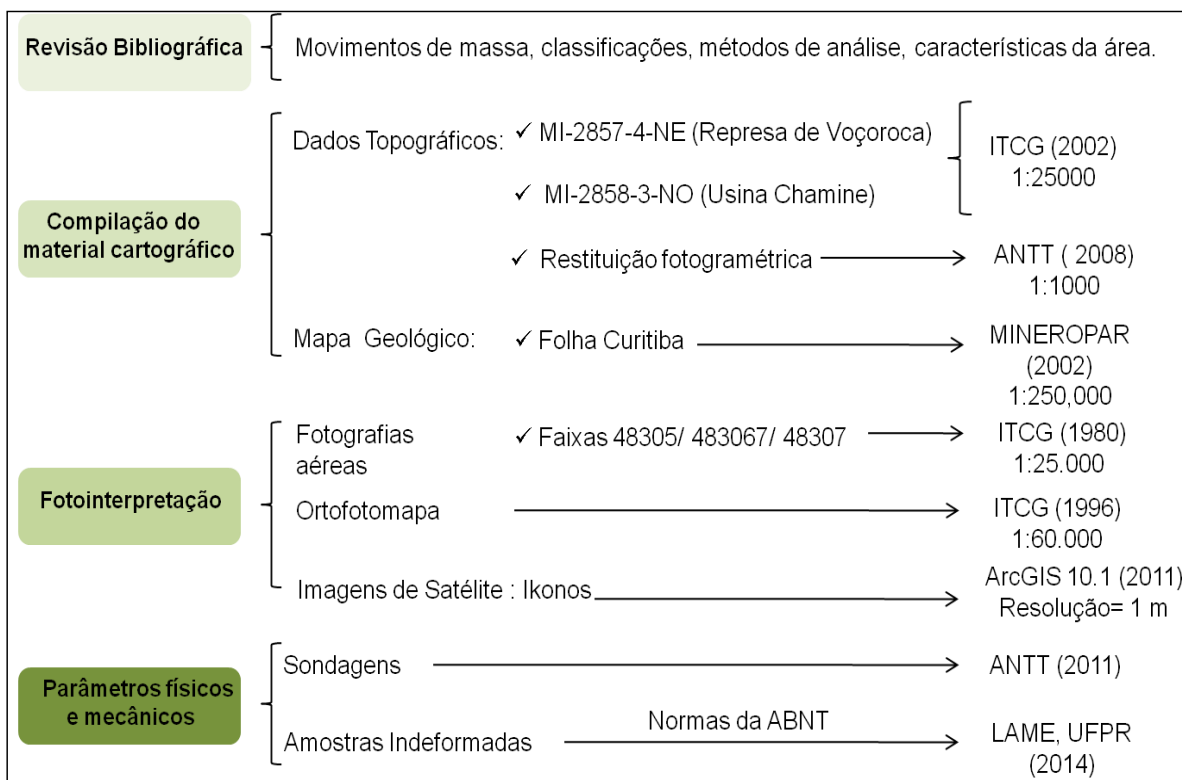


Figura 1. Materiais utilizados na realização do trabalho.

A caracterização básica da área de estudo foi realizada através da compilação do material cartográfico existente, mapas topográficos, fotografias aéreas e imagens de satélite, com a finalidade de gerar um banco de dados em formato digital de mapas bases, obtendo-se como resultado os seguintes mapas temáticos: modelo digital de elevação (MDE), declividade, solos, orientação e curvatura das vertentes. Estes mapas permitiram as primeiras observações sobre os aspectos fisiográficos presentes na área em estudo. A base do material cartográfico que foi utilizado é descrito a seguir:

Os dados da base topográfica foram elaborados a partir da união das folhas topográficas MI-2857-4-NE (Represa de Voçoroca) e MI-2858-3-NO (Usina Chaminé) à escala 1: 25.000, executadas pelo Ministério da Defesa - Exército Brasileiro no ano 2002, com curvas de nível espaçadas a cada 10 metros, no sistema de coordenadas UTM, fuso 22 Sul, com *datum* horizontal Sirgas 2000. A área abrange 2 km².

Para melhor detalhe, também foi utilizada a base 1:1.000, resultado da restituição fotogramétrica elaborada em 2008, pela empresa Engefoto e disponibilizada pelo pessoal Autopista Litoral Sul. Esta base abrange uma faixa de domínio de 200 metros para cada lado a partir da rodovia, demarcando 800 metros da área total.

A fotointerpretação das fotografias aéreas e análises das imagens de satélite tiveram como objetivo a identificação de padrões de drenagem, estruturas presentes e a identificação de locais com evidências de movimentações recentes e antigas. Para isto, foram utilizados os seguintes materiais:

- ✓ *Fotografias aéreas* pancromáticas da cobertura aerofotogramétrica, faixas 48305/ 48306/ 48307, a escala 1:25.000 do Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (ITCG, PR), do ano 1980; e ortofotomapa do ano 1996;
- ✓ *Imagens de Satélite* Ikonos com resolução de 1 metro, adquirida o 8/03/2011 (disponível no software ESRI ArcGis 10.1).

O mapa base utilizado para a descrição das unidades geológicas da área foi o Mapa Geológico, Folha Curitiba, na escala 1:250.000, publicado pela MINEROPAR em 2005.

Por meio da sobreposição do resultado obtido na fotointerpretação foram interpretadas novas orientações de diques básicos, obtendo-se uma base de dados local das estruturas a escala 1:25.000.

1.3.1. Dados disponíveis da área

Foram fornecidos pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) diversos relatórios de sondagens realizados entre os anos 2011 e 2012 no trecho em estudo, em locais onde ocorreram escorregamentos translacionais, 16 pontos de sondagens a percussão estão dentro da área em estudo, o que permitiu a obtenção de valores preliminares da resistência dos solos, como ângulo de atrito e coesão.

No cálculo dos parâmetros de resistência (ϕ e c) das sondagens foram apenas consideradas as informações dos primeiros 3 metros perfurados, já que estes valores de ângulo de atrito e coesão obtido pelos SPT serão comparados com os valores de ângulo de atrito e coesão obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto das amostras indeformadas, coletadas a uma profundidade máxima de 2,3 metros.

Estes valores serão analisados e apresentados no Capítulo 5 (Caracterização e classificação geotécnica dos solos do presente trabalho).

1.3.2 Trabalhos de Campo

As atividades de campo envolveram várias campanhas ao local em estudo com diferentes propósitos:

- ✓ Reconhecer os aspectos gerais da área como a topografia, tipos de vegetação, tipos de solos.
- ✓ Verificação *in situ* das cicatrizes de escorregamentos translacionais identificadas nas fotografias aéreas e imagens de satélite.
- ✓ Coleta de quatro (04) amostras indeformadas em função dos tipos de solos (03 amostras de solo residual e 01 de Colúvio), para definir os parâmetros de resistência em laboratório.

- ✓ Validação dos resultados obtidos no mapeamento usando técnicas SIG.

1.3.3 Trabalhos de Laboratório

No Laboratório de Materiais e Estruturas LAME / LACTEC da UFPR, foram feitos os ensaios de caracterização e resistência ao cisalhamento das quatro (04) amostras indeformadas coletadas para a determinação dos parâmetros de resistência dos solos, como a coesão (c) e o ângulo de atrito interno (Φ).

a) Ensaios de caracterização

As propriedades físicas dos solos foram analisadas por meio dos seguintes ensaios de caracterização: análise de granulométrica, limites de consistência, peso específico natural (γ_{nat}) e teor de umidade (h). Estes ensaios obedeceram às orientações descritas nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), tais como:

- ABNT-NBR 6508 (1984). Peso Específico dos sólidos.
- ABNT-NBR 7181 (1984). Análise granulométrica.
- ABNT-NBR 6459 (1984). Limite de liquidez (LL)
- ABNT-NBR 7180 (1984). Limite de plasticidade (LP)
- ABNT-NBR 6457 (1986). Teor de umidade (h).

b) Ensaios de Cisalhamento Direto

Para realizar este ensaio foram coletadas quatro (04) amostras indeformadas, para a obtenção dos parâmetros de resistência dos solos, como o ângulo de atrito e a coesão. A coleta das obedeceu às recomendações da norma ABNT-NBR 9604/1986 (Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas).

Seguindo as recomendações da norma, a dimensão dos blocos de prova extraídos para a execução dos ensaios foi de 30x30 cm, destes blocos foram talhados e ensaiados três corpos de prova com dimensões 10x10x2 cm, aplicando tensões normais de 30 kPa, 60 kPa e 90 kPa na prensa Geocomp, com velocidade de cisalhamento de 0,7 mm/min em condições de umidade natural e saturada. Estes corpos de prova foram submetidos previamente ao adensamento.

1.3.4 Compilação de dados e confecção de mapas

Nesta etapa são transferidas todas essas informações das matérias cartográficas para o meio digital visando à geração dos mapas temáticos e sua combinação com os dados obtidos na análise das sondagens e nos ensaios de laboratório. Com essas informações são gerados os mapas de índices de segurança, utilizando a base topográfica 1:25.000 (2002) na área toda e a restituição fotogramétrica 1:1.000 (2008) na faixa de domínio (200 m de cada lado da rodovia). Os mapas resultantes são obtidos pela aplicação das equações de fatores de segurança integrados em ambiente SIG, simulando a variando o grau de saturação no solo, em solo seco e em solo com 30% de saturação.

2 ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

A área de pesquisa está localizada no município de Tijucas do Sul ao leste do Estado do Paraná, distando cerca de 50 quilômetros da cidade de Curitiba, englobando um trecho da rodovia BR-376, entre as coordenadas UTM: E 699800 / S 7138600 e E 701400 / S 7139800. O trecho da rodovia situa-se nas proximidades da Represa da Voçoroca (Figura 2). Possui uma área de abrangência de 2 km², entre os quilômetros 658+820 m e 660+690 m.

A principal via de acesso a partir de Curitiba é a mesma BR-376 no sentido de Curitiba – Garuva.

A área esta inserida na unidade morfoescultural do Primeiro Planalto Paranaense cuja subunidade morfoescultural é denominada Planalto de Curitiba (MINEROPAR, 2006) a qual constitui uma zona limítrofe entre o Segundo Planalto e a Serra do Mar Paranaense.

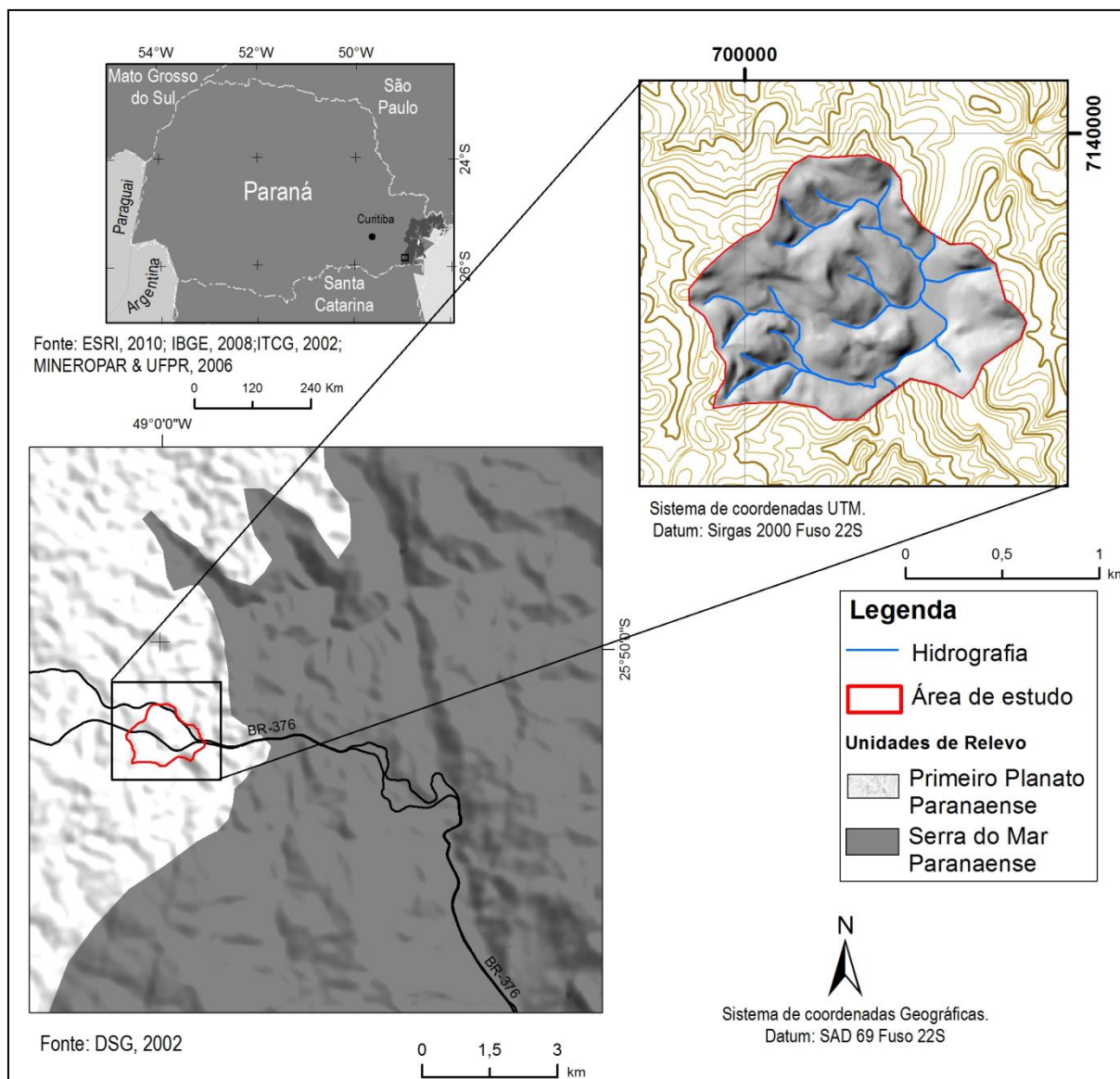


Figura 2. Localização da área de estudo.

O Planalto de Curitiba na área de estudo encontra-se modelado principalmente em rochas do Complexo Atuba, o relevo apresenta uma gradiente de 130 metros com altitudes variando entre os 767 metros (mínima) e 897 metros (máxima) m.s.n.m, formando uma paisagem suavemente ondulada com planícies constituídas por sedimentos colúvio-aluvionares recentes ao longo dos principais cursos de água, como é o rio São João localizado ao norte da região.

As formas predominantes no relevo são topos alongados e aplanados, vertentes convexas e vales em “V” aberto, com uma direção preferencial da morfologia variando entre N-S e NW-SE, com declividades predominantes entre 9 e 20° (Figura 3).

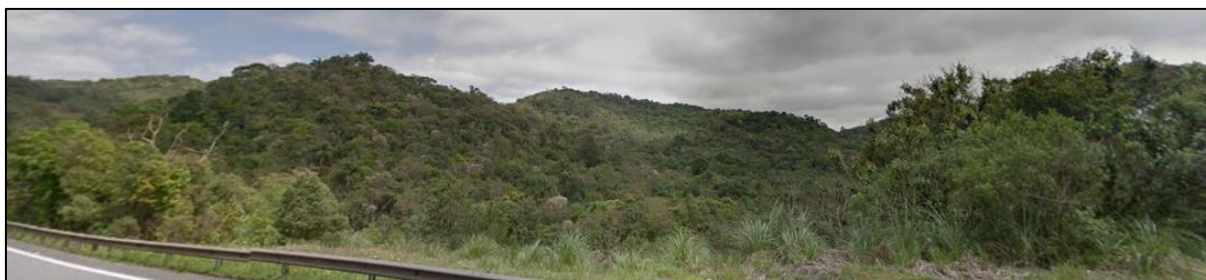


Figura 3. Aspecto dos topos alongados e aplanados no km 660 + 600.

A porção leste do Paraná está constituída por rochas cristalinas, como xistos, migmatitos e gnaisses. Esta porção vem sendo estudada desde os trabalhos de mapeamento da Comissão da Carta Geológica do Paraná, feitos no litoral paranaense (FUCK, 1967 a,b,c.; FUCK *et al*, 1967a; FUCK *et al*. 1969a). O conjunto litoestratigráfico foi denominado Complexo Gnáissico-Migmatítico por vezes designado Costeiro, na compilação de cartas geológicas realizadas pela CPRM (1989), e redefinido como Complexo Atuba por SIGA Jr. *et al*. (1994).

O Complexo Atuba se insere no âmbito do Domínio Curitiba, que se limita ao noroeste com as sequências meta-sedimentares dos grupos Açungui e Setuva, a ao sudeste com os gnaisses granulíticos do Domínio Luís Alves, contactos esses que se faz por importantes zonas de cisalhamento. No domínio Curitiba predomina rochas gnáissicas bandeadas, migmatíticas, da fácies do anfibolito, representadas principalmente por biotita-anfibólito-gnaisses contendo leucossomas de composição tonalito-granodioritas além das graníticas, que compõem o denominado Complexo Atuba. Este complexo caracteriza-se por um conjunto de migmatitos formados no Paleoproterozóico (2000 ± 200 Ma), remigmatizados no Neoproterozóico (600 ± 20 Ma), período em que as isothermas atingiram temperaturas superiores a 500°C .

O padrão estrutural observado é indicativo de uma tectônica controlada em grande parte por cisalhamento, com importante componente lateral, e transporte relativo em direção a sul-sudeste (SIGA Jr *et al*. 1994).

Uma forte foliação milonítica orientada NE-SW constitui o principal padrão estrutural, marcado pelo achatamento e estiramentos dos minerais. Esta foliação é caracterizada por seu aspecto anastomosado e concentração máxima em $N66^{\circ}\text{E}/64^{\circ}\text{NW}$ (MINEROPAR, 2004).

Também foi identificado um sistema associado a diques básicos de direção NW do período Mesozoico – Cretáceo, de aproximadamente 135 Ma. Os dados

geocronológicos indicam que esta foliação milonítica foi desenvolvida durante o Neoproterozóico, possuindo caráter heterogêneo, não coaxial em regime dúctil e em condições físico-química da fácies xisto verde (zona da biotita), até o limite inferior da fácies anfibolito

Na folha Curitiba a escala 1:250.000 da MINEROPAR (2005) descreve que no interior da região de estudo constam rochas com idades Proterozoico Inferior/Arqueano, representados pelo conjunto do migmatítico / gnáissico. As rochas pertencentes a este conjunto representam terrenos relativamente profundos estromáticos com paleossoma de biotita-hornbenda gnaiss, mica-quartzo xisto, ultrabasito, metabasito e anfibolito. São frequentes as intercalações de corpos anfibolíticos, por vezes granatíferos, bem como de xistos magnesianos, desde lentes centimétricas até corpos métricos. Também são comuns feições relacionadas a uma segunda fase de migmatização, com mobilizados róseos (K-feldspato), concordantes ou não ao bandejamento gnáissico.

Na Figura 4, que corresponde ao mapa geológico da região em estudo (folha Curitiba, MINEROPAR 2005), é possível observar que a área está completamente inserida no Complexo Atuba. Nas observações de campo verificou-se a correspondência do descrito neste mapa, pela predominância do conjunto do migmatítico / gnáissico na área inteira.

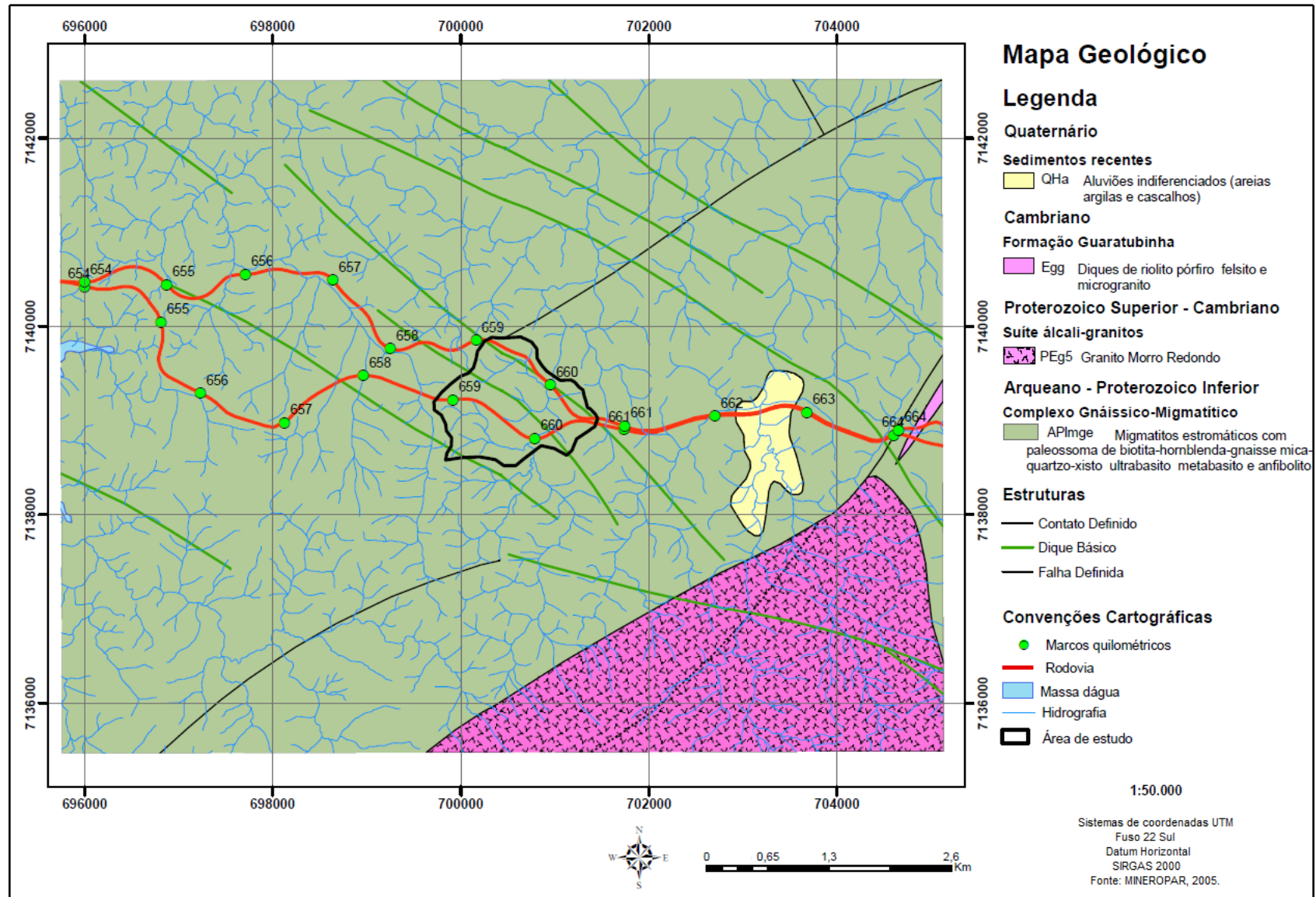


Figura 4. Mapa Geológico da área de estudo com os dados da foteointerpretação. FONTE: Modificado da MINEROPAR (2005)

Em relação ao clima atual, segundo a classificação de Köppen, que atualmente é considerada a melhor classificação climática por levar em conta fatores como o relevo, regime de chuvas e a temperatura, a região é influenciada pelo seguinte tipo climático:

- Clima oceânico (Cfb): Caracterizado por apresentar verão mais úmido e fresco que o inverno, com chuvas abundantes e bem distribuídas ao longo de todo o ano. As médias de temperatura no mês mais quente são inferiores a 22 °C, com pelo menos quatro meses (inverno) com médias inferior a de 14°C e como mínima 8° C.

A pluviosidade no Primeiro Planalto Paranaense varia bastante de acordo com a altitude da estação de monitoramento. As três estações mais próximas à área de estudo indicam que a precipitação acumulada anual entre os anos 2006 e 2014 variou de 1090 mm na estação Voçoroca (localizada a 9 km da área), 2100 mm na estação Transpetro (localizada a 10 km da área) e 2600 mm na estação Garuva (localizada a 24 km da área).

- A Figura 5 apresenta a acumulação anual registrada nas estações pluviométricas anteriormente descritas. Os eventos de máxima pluviosidade ocorreram no mês de março nos anos 2008 e 2011, quando as precipitações ultrapassaram os 690 mm. Estes eventos pluviométricos intensos estão relacionados a uma série de escorregamentos translacionais e rotacionais ocorridos ao longo da BR-376, descritos no Capítulo 4 desta dissertação.

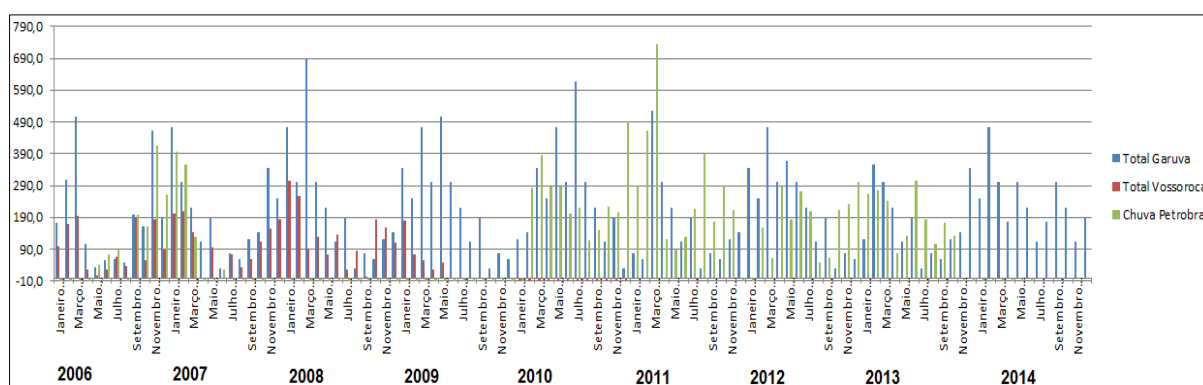


Figura 5. Distribuição mensal média das chuvas em estações na BR-376, PR (2006-2014).

No período entre 27 de fevereiro e 12 de março de 2014 foi instalada uma rede de instrumentação composta por quatro (04) pluviógrafos, dos quais um deles, o P1 encontra-se na área de estudo, no km 660+570 m, conforme localização apresentada na Tabela 1

Tabela 1. Localização dos instrumentos

INSTRUMENTO	COORDENADAS		COTA	Km	PISTA/LADO	INÍCIO DA OPERAÇÃO
P1	701387 E	7139099 S	800	660+570m	Sul / LD	12/03/2014
P2	707073 E	7137405 S	544	667+900m	Norte / LD	12/03/2014
P3	706862 E	7196189 S	469	669+300m	Sul / LD	27/02/2014
P4	709353 E	7129240 S	190	676	Sul / LE	28/02/2014

A variação espacial da distribuição das chuvas na região sudeste paranaense desde março até o julho 2014, está representada na Figura 6, onde se observa que os valores de precipitação máximos ocorreram os dias 01 de abril de 2014, quando foram registrados 170 mm de precipitação e o dia 06 de junho de 2014 com 110 mm de precipitação.

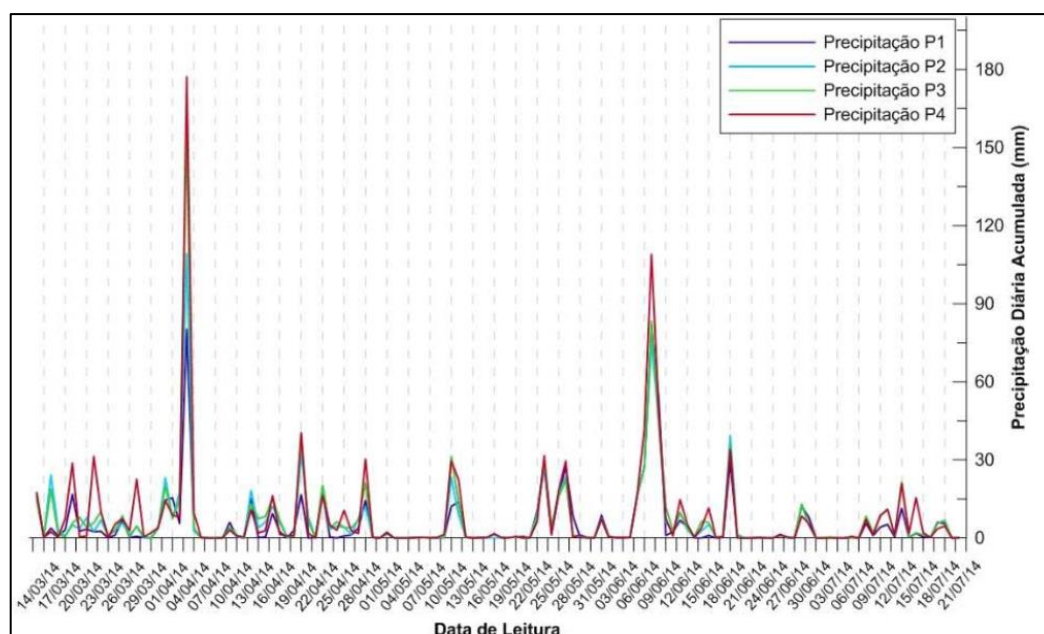


Figura 6. Precipitação diária registrada nos quatro pontos de monitoramento.

O tipo de vegetação na região, segundo o Mapeamento da Floresta Atlântica do Paraná (SEMA, 2002), é composto por Floresta Ombrófila Densa Montana (floresta atlântica do meio das encostas). Este tipo de floresta ocorre nas partes mais altas das encostas, em geral entre 700 e 1000 metros de altitudes, sobre o relevo convexo, comumente de boa drenagem e profundidade, geralmente sobre solos cambissolos, sujeitos a deslizamentos frequente o que da origem nesses locais a solos mais rasos. A altitude das árvores no local pode alcançar ate 25 metros, apresentando frequentemente nas áreas mais baixas, no pé do tapete herbáceo (Figura 7).



Figura 7. Aspecto da Floresta no km 659 + 100.

A Figura 8 apresenta o perfil esquemático dos principais tipos de vegetação que ocupa a Planície Litorânea, a Serra do Mar e o Primeiro Planalto Paranaense.

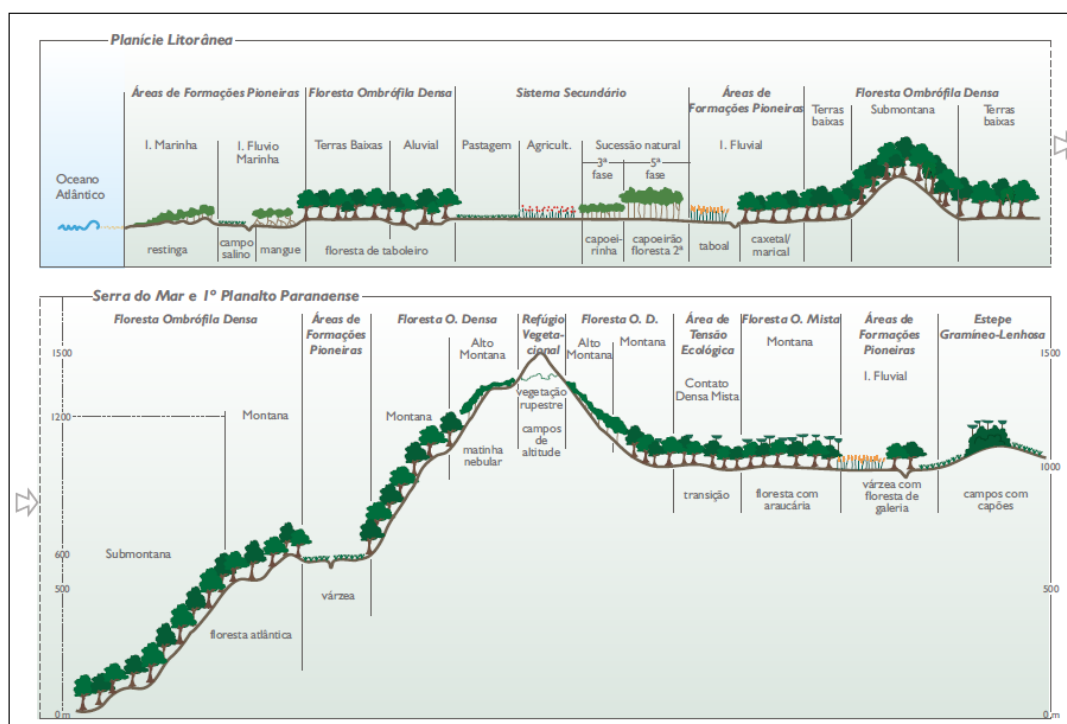


Figura 8. Perfil esquemático dos principais tipos de vegetação entre a Planície Litorânea, a Serra do Mar e o Primeiro Planalto Paranaense. FONTE: SEMA (2002)

Em relação ao tipo de solo, o mapa simplificado de solos do Paraná publicado pela SBCS, 2012 descreve que na área ocorre o tipo de solo Cambissolo + Neossolo Regolíticos (C+RR). Os Cambissolos são solos geralmente pouco espessos, de fertilidade bastante variável. Quando férteis os solos encontram-se em relevo mais acidentado, os de baixa fertilidade são situados em relevo suavemente ondulados.

Na área, os cambissolos estão associados ao intemperismo e pedogênese dos migmatitos e gnaisses (solo residual), variando sua coloração entre vermelha e amarela. Geralmente apresentam quartzo e feldspato potássico centimétricos, em meio a uma matriz silto-argilosa.

Os Neossolos Regolíticos são solos rasos pouco desenvolvidos, não hidromórficos e de textura normalmente arenosa, apresentando alta erodibilidade principalmente em declives mais acentuados ($>20,25^\circ$). Abrangem diversos ambientes associados desde áreas de relevos muito movimentados até as áreas planas. Quanto à matéria de origem varia desde sedimentos colúvio - aluviais até materiais provenientes da decomposição de rochas do Complexo Cristalino.

3 ASPECTOS TEÓRICOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais tópicos abordados ao longo do trabalho. A primeira parte refere-se aos movimentos de massa (3.1), onde se busca descrever e classificar alguns desses processos, assim como os atributos que favorecem a instabilidade de uma determinada encosta ou vertente. A segunda parte refere-se às diferentes abordagens de previsão (3.2), onde é apresentada de forma geral, a aplicação e limitações dos diferentes métodos utilizados na análise de estabilidade de vertentes.

3.1 Movimentos de massa gravitacionais

Movimento de massa é o movimento (vertical, horizontal ou inclinado) de um volume de material litológico (rocha, formação superficial ou solo) ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como a água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais da vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos.

Os tipos de movimentos são classificados como quedas, tombamentos, escoamentos, escorregamentos e espalhamentos laterais. A Tabela 2 apresenta a classificação dos tipos de movimentos proposta por VARNES (1978), que se baseia no tipo de movimento e no tipo do material transportado.

Tabela 2. Classificação dos tipos de Movimentos de Massa. FONTE: VARNES (1978).

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			ROCHA	SOLOS	
				GROSSERIO	FINO
QUEDA			De rocha	De Detritos	De Solo
TOMBAMENTO			De Rocha	De Detritos	De solo
ESCORREGAMENTOS	Rotacional	poucas unidades	abatimento de rocha blocos rochosos	abatimento de detritos blocos de detritos	abatimiento de solo blocos de solo
	Translacional	muitas unidades	De Rocha	De Detritos	De solo
ESPALHAMENTOS LATERAIS			De Rocha	De Detritos	De solo
CORRIDA / ESCOAMENTOS			De Rocha (rastejo profundo)	De Detritos	De solo
				(rastejo de solo)	

Posteriormente, surgiram inúmeras classificações, tais como, Hutchinson (1968 e 1974), Zaruba e Mencl (1976), Crozier (1986), Selby (1993) e dentre as classificações brasileiras destacam-se as de Freire (1965), de Giudicini e Nieble (1984), de IPT (1991) e de Augusto Filho (1992).

A classificação adotada neste trabalho é a proposta por AUGUSTO FILHO (1992), por ser uma classificação simples e de fácil compreensão, como o observado na Tabela 3.

Tabela 3. Principais tipos de movimentos de massa. FONTE: AUGUSTO FILHO (1992).

PROCESSOS	DINÂMICA/GEOMETRIA/MATERIAL
Rastejos	<ul style="list-style-type: none"> - vários planos de deslocamento (internos); - velocidades muito baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade; - solo, depósitos, rocha alterada/ fraturada; - movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; - geometria indefinida.
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> - poucos planos de deslocamento (externos); - velocidades médias (m/h) a altas (m/s); - pequenos a grandes volumes de material; - geometria e materiais variáveis: <ul style="list-style-type: none"> • Planares: solos pouco espessos, solos e rochas com plano de fraqueza; • Circulares: solos espessos homogêneos e rochas fraturadas; • En Cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza.
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> - sem planos de deslocamento; - movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado; - velocidades muito altas (vários m/s); - material rochoso; - pequenos a médios volumes; - geometria variável: lascas, placas, blocos, etc; - Rolamento de matacão; - Tombamento.
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> - muitas superfícies de deslocamento; - movimento semelhante ao de um líquido viscoso; - desenvolvimento ao longo de drenagens; - velocidades medias a altas; - mobilização do solo, rocha, detritos e água; - grandes volumes de material - extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Os **rastejos** são caracterizados por apresentar movimentos lentos e contínuos da ordem de cm/ano e chegam a envolver grandes massas de solo. Podem ou não apresentar superfície de ruptura definida, ocorre em declividades acima de 35°. Segundo GUIDICINI e NIEBLE (1984), sua movimentação esta associada à ação da gravidade e ao efeito da variação térmica, com mecanismos de expansão e contração resultando no deslocamento do material vertente abaixo.

São comumente identificados pela perda da resistência do solo por saturação e efeitos externos, como inclinação de elementos lineares, a exemplo de cercas, postes, trilhos, árvores e outros (Figura 9).

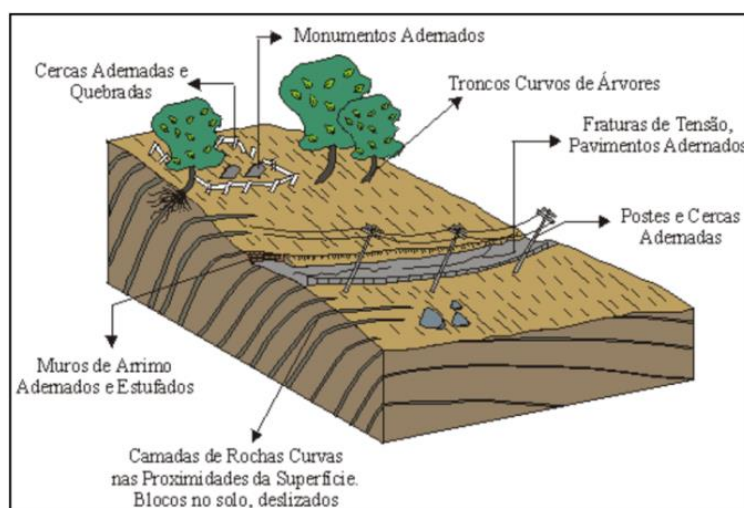


Figura 9. Processo de rastejo. FONTE: <http://ageoesta.blogspot.com.br>.

Os **escorregamentos** são movimentos rápidos, de curta duração, com planos de rupturas bem definidos, permitindo a distinção do material deslizado daquele que não se moveu. São geralmente divididos em função da natureza do material instável e na forma do plano de ruptura, podem ser rotacionais, translacionais e em cunha.

Nos **escorregamentos rotacionais ou circulares** o material geológico movimentado sofre pouca deformação, em geral ocorre em pacotes de solos espessos e homogêneos de rochas argilosas ou cristalinas intensamente fraturadas. A superfície de ruptura deste tipo de movimento é circular ou em forma de “colher” - côncava.

É bastante comum neste tipo de escorregamento a ocorrência de sucessivas rupturas, onde as fissuras expostas após a movimentação são concêntricas em planta e côncavas na direção do movimento conforme mostra a Figura 10.

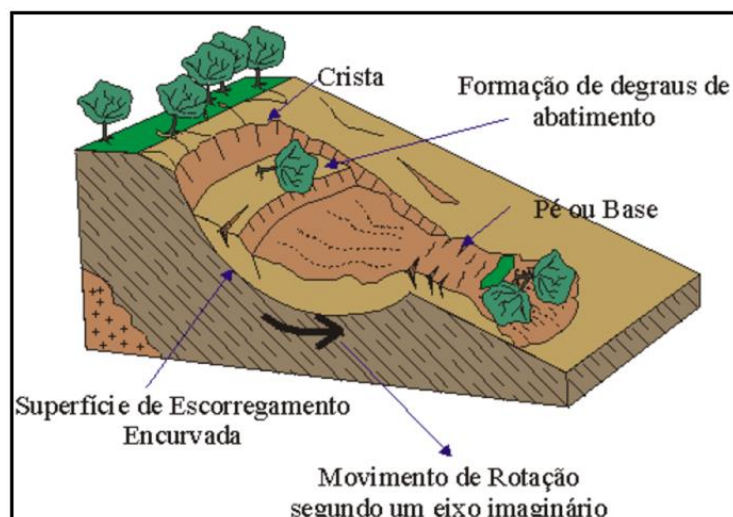


Figura 10. Processo de escorregamento rotacional. FONTE: <http://ageoesta.blogspot.com.br>.

Os **escorregamentos translacionais ou planares** são processos muito frequentes nas encostas serranas brasileiras. Caracterizam-se por apresentarem uma superfície de ruptura planar, acompanhando de forma geral as descontinuidades existentes nos materiais geológicos (HUTCHINSON, 1968a; HUTCHINSON, 1989b e FERNANDES e AMARAL, 1996). O movimento é controlado por superfícies de fragilidade com baixo nível de resistência ao corte, pois, desenvolvem-se ao longo de falha, fraturas, contatos litológicos ou superfícies de contacto entre rocha-sã e os depósitos da vertente (COROMINAS, 1996). Os escorregamentos translacionais são fortemente controlados pela topografia (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994), sendo originados durante chuvas intensas após a saturação do solo no contato entre o solo transportado e solo residual, e até mesmo no manto de alteração do solo residual. O material mobilizado geralmente sofre mais deformação que no escorregamento rotacional (Figura 11).

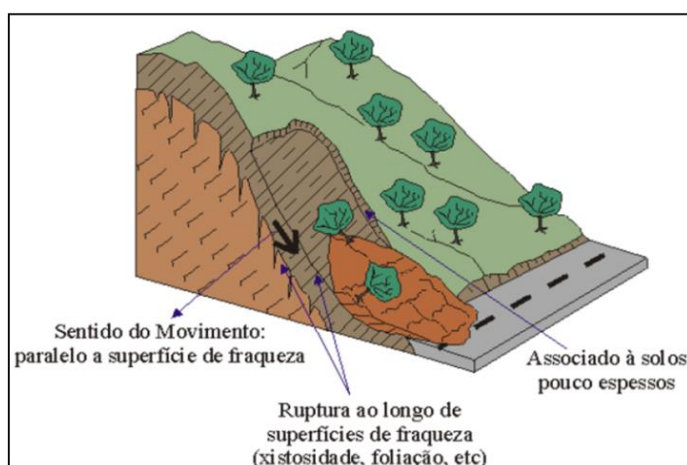


Figura 11. Processo de escorregamento translacional. FONTE: <http://ageoesta.blogspot.com.br>.

Escorregamentos em cunha estão associados à saprolitos e maciços rochosos, nos quais dois ou mais planos de ruptura planar, desfavoráveis à estabilidade, condiciona o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos (Figura 12). Este processo é comum em taludes de corte ou em encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento, natural ou antrópico (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

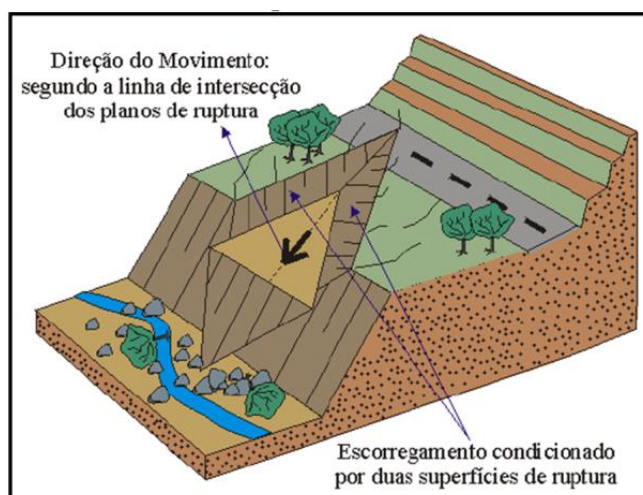


Figura 12. Processo de escorregamento em cunha. FONTE: <http://ageoesta.blogspot.com.br/>

Quedas são movimentos definidos pela ação em queda livre de materiais geológicos (rocha, solo ou detritos) de um talude geralmente íngreme ou escarpa, sem plano de deslocamento. AUGUSTO FILHO (2001) destaca que por se tratar de queda livre são processos de alta velocidade (m/s) que podem atingir grandes distâncias, onde a geometria varia entre placas, lascas, blocos, etc. (Figura 13).

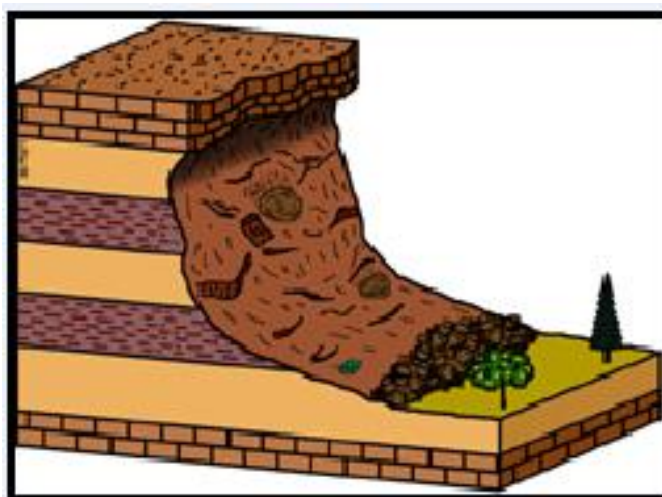


Figura 13. Processo da Queda. FONTE: <http://w3.ualg.pt>

Corridas de detritos são formas de escoamento rápido ocasionado pela perda de atrito interno das partículas de solo, nos quais os materiais se comportam como fluidos altamente viscosos. A massa desloca-se ao longo das redes de drenagens, compostas por materiais de diversos tamanhos (solos, rochas e detritos) e pode atingir grandes distâncias com extrema rapidez mesmo em áreas pouco inclinadas, com capacidade destrutiva muito maior que os escorregamentos (GIUDICINI e NIEBLE, 1984; FERNANDES e AMARAL, 1996; LOPES, 2006) (Figura 14).

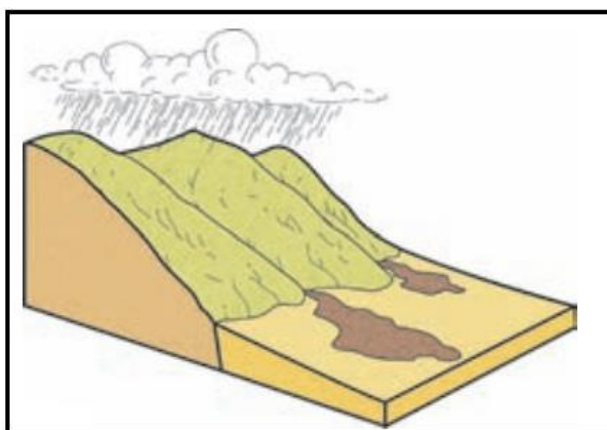


Figura 14. Esquema de corrida detrítica. FONTE: LOPES (2006).

3.2 Fatores condicionantes e desencadeantes de movimentos de massa em vertentes

Na análise de estabilidade de vertentes, uma das primeiras abordagens realizadas é o estudo dos fatores que podem desestabilizar uma determinada vertente, encosta ou talude. De modo geral pode-se dizer que as causas de desestabilização são condicionadas a uma cadeia de eventos, que geralmente tem origem na ação geológica, geomorfológica, climática e antrópica. Estas causas são descritas a seguir por diferentes autores.

De acordo com TERZAGHI (1952) as causas podem ser separadas dependendo de sua posição no talude em:

- a) *Causas Internas*: são as que levam ao colapso sem modificar a geometria do talude. Resultam de uma diminuição da resistência interna do material (aumento da pressão hidrostática, diminuição da coesão e ângulo de atrito interno por processos de alteração).
- b) *Causas Externas*: aumento das tensões cisalhantes, sem que haja diminuição da resistência do material (aumento da declividade do talude por processos

naturais ou artificiais, deposição de material no topo do talude, abalos sísmicos e vibrações).

c) *Causas intermediárias*: são as que resultam de efeitos ocasionados por agentes externos no interior do talude (liquefação espontânea, rebaixamento rápido, erosão retrogressiva).

VARNES (1978) divide os mecanismos deflagradores dos escorregamentos em dois grupos, reconhecendo os fatores que aumentam as forças solicitações e os que reduzem a resistência do terreno, com os respectivos fenômenos naturais à qual estão associados (Tabela 4).

Tabela 4. Fatores Deflagradores dos movimentos de massa. FONTE: VARNES (1978).

AÇÃO	FATORES	FENÔMENOS
Aumento das Solicitações	Remoção de massa (lateral ou da base)	Erosão, escorregamentos, cortes
	Sobrecarga	Peso da água da chuva, neve, granizo. Acumulo natural de material Peso da vegetação Construção de estruturas de aterro
	Solicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões, etc. Explosões, tráfego, sismos induzidos.
	Pressões laterais	Água em trincas, material expansivo, etc,
Redução da Resistência	Características inerentes ao material (textura, estrutura, etc.)	Características geomecânicas do material, estado de tensões iniciais
	Mudança nas características do material	Intemperismo, redução da coesão, ângulo de atrito. Elevação do nível d'água
	Outras causas	Enfraquecimento devido ao rastejo progressivo Ação de raízes e animais

AUGUSTO FILHO e VIRGILI (1998) citam de forma resumida os principais agentes condicionantes dos escorregamentos a processos correlatos na dinâmica ambiental Brasileira, descritos a seguir:

- Características climáticas;
- Características e distribuição dos materiais que compõem o substrato das encostas e/ou taludes;
- Características geomorfológicas;
- Regime das águas de superfície e sub-superfície;
- Características de uso e ocupação do solo, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica como cortes e aterros.

ZUQUETTE (1987) apresenta em seus estudos uma listagem de atributos que estão diretamente relacionados aos movimentos de massa gravitacionais, e que devem ser considerados, respeitando-se a escala, as características da região e a finalidade do trabalho, da seguinte maneira:

1. Atributos Qualitativos: são aquelas propriedades apresentadas por descrições baseadas em observações de campo (análise geomorfológica) e medidas simples, previstas para fases iniciais de mapeamento, as interpretações de fotografias aéreas e as análises de mapas de pequena escala (Combinação Qualitativa de Mapas);

2. Atributos Quantitativos: são aquelas propriedades apresentadas pelos valores obtidos das características físicas (peso específico, porosidade, grau de saturação e plasticidade) e das propriedades de resistência (cisalhamento, compressão e tração).

É possível observar que apesar dos autores apresentarem terminologias diferentes, os conceitos utilizados na classificação dos atributos que podem condicionar ou desencadear movimentos de massa possuem significados similares, concordando todos eles, que as variáveis relacionadas aos processos de instabilização de encostas atuam de forma integrada, e, portanto, não devem ser analisadas isoladamente.

A listagem descrita por ZUQUETTE (1998) é composta pelos principais atributos que estão diretamente relacionados aos movimentos de massa gravitacionais, de caráter quantitativo, e que foram considerados para o análise deste trabalho.

3.2.1 Geologia

Conhecer o tipo litológico é de fundamental importância, assim como seu grau de alteração e resistência mecânica. De modo geral pode-se dizer que quanto mais alterado o material rochoso esteja, maior a potencialidade de ocorrência movimentos de massa gravitacionais (KOZCIAK, 2005).

As principais características a serem levantadas em relação à caracterização dos materiais inconsolidados em quanto a sua variabilidade vertical e lateral, são as seguintes (BONUCELLI, 1999; AMARAL, 2007):

- ✓ gênese: solo residual (rocha de origem); solo transportado: talus, colúvio, aluvião;
- ✓ textura e plasticidade; composição mineralógica;
- ✓ índices físicos: umidade, ângulo de atrito, coesão, peso específico natural e peso específico dos sólidos;
- ✓ espessura do solo.

Segundo BONUCCELLI (1999), todos os atributos de uma encosta constituída de materiais inconsolidados influenciam na sua resistência ao cisalhamento. O que permite afirmar que quanto menor a resistência ao cisalhamento, maior a predisposição aos processos em estudo, o autor afirma que:

- os solos saturados apresentam valores de poro-pressão positivas, e, portanto menor resistência ao cisalhamento;
- os solos parcialmente saturados apresentam-se com poro-pressão negativa o que da origem ao aumentando da sua resistência ao cisalhamento;

3.2.2 Geomorfologia

As características morfológicas e morfométricas das vertentes (declividade, forma, orientação e altimetria), podem influenciar na instabilidade do terreno e atuam na determinação do volume e velocidade do escoamento superficial (KOZCIAK, 2005).

a) Declividade

A declividade fornece a medida de inclinação do relevo em relação ao plano na horizontal. EMBRAPA (2006) apresenta uma variedade de classes de declividades relacionadas com o tipo de relevo, para facilitar as inferências sobre a suscetibilidade dos solos à erosão. Estas distinções de classes foram aplicadas na geração do mapa de declividade do presente trabalho.

Baseado no relevo as seguintes classes de declividade são reconhecidas:

- Plano: superfície plana, onde os desníveis são muito pequenos, com declividades variáveis de 0 a 3%;
- Suave ondulado: superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas (elevações até 100 metros), apresentando declives suaves, predominantemente variáveis de 3 a 8%;

- Ondulado: superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas, apresentando declives moderados, predominantemente variáveis de 8 a 20%;
- Forte ondulado: superfície de topografia movimentada, formada morros (elevações de até 200 metros) e raramente colinas, com declives fortes, predominantemente variáveis de 20 a 45%;
- Montanhoso: superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes, predominantemente variáveis de 45 a 75%;
- Escarpado – áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpamentos, tais como: frentes de cuevas e vertentes de declives muito fortes, usualmente ultrapassando 75%

b) Formas das vertentes

BONUCELLI (1999) apresenta um estudo baseado na elaboração de uma matriz com variações nas feições verticais e longitudinais das vertentes, a fim de avaliar para cada vertente em estudo, quais seriam as situações mais ou menos favoráveis para a ocorrência de movimentos de massa gravitacionais (Tabela 5).

Tabela 5. Características do perfil de encostas relacionadas à ocorrência de movimentos de massa gravitacionais. FONTE: BONUCELLI (1999).

PERFIL DA ENCOSTA	CARACTERÍSTICAS DO EVENTO
encosta côncava	são geralmente mais evoluídos em termos geomorfológicos e estariam menos sujeitas a ocorrência desses processos
encosta convexa	menos evoluídas e portanto mais sujeitas a ocorrência dos processos
encostas retilíneas	estariam no situação intermediário, entre os dois casos anteriores
encostas convexo-côncavas	nessa ordem do topo para a base, seriam mais propensas
encostas convexo-retilíneas	de topo para a base, também seriam mais propensas

A curvatura das vertentes é um fator variável que merece destaque, a curvatura vertical refere-se ao caráter côncavo/ convexo quando analisado em perfil e a curvatura horizontal refere-se ao caráter divergente/ convergente dos fluxos de

matéria sobre o terreno quando analisado em plano de projeção horizontal (Figura 15). A combinação de ambas descreve a forma da vertente (SCHMIDT *et al*, 2003).

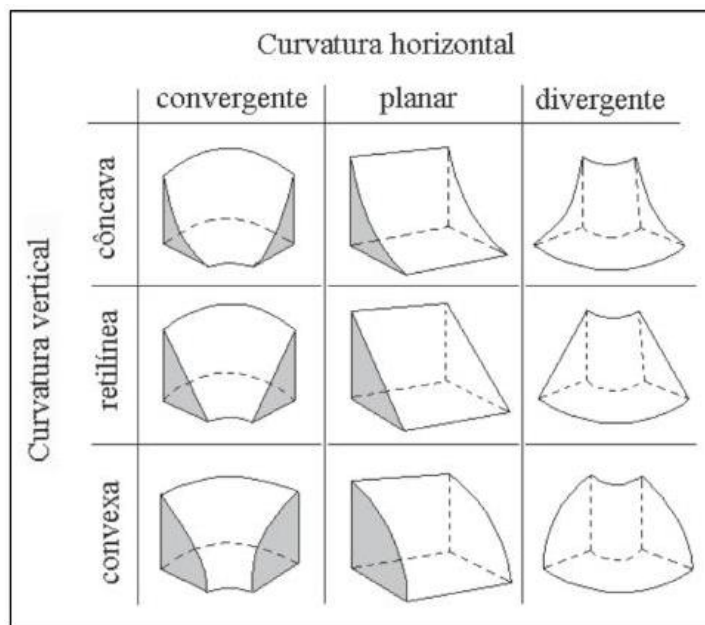


Figura 15. Curvatura das vertentes. FONTE: DIKAU (1990).

Este fator não deve ser analisado somente de forma individual, e sim em conjunto com outras características, como contribuição do entorno quanto ao escoamento superficial, amplitude de relevo, posição do talude na vertente bem como a declividade.

c) Orientação das vertentes

Este atributo fornece informações sobre as vertentes que se encontram mais expostas às variáveis climáticas, como ao sol e ao vento (DAÍ e LEE, 2002). Estas variáveis podem contribuir na suscetibilidade das vertentes direta ou indiretamente.

3.2.3 Água

A água é um dos fatores que mais interferem na estabilidade das vertentes, principalmente em forma de precipitação. Segundo GERSCOVICH (2012) a capacidade de interceptação da água depende do tipo de vegetação, da intensidade e da duração da chuva. O fator chuva está diretamente associado com a dinâmica da água tanto de superfície como de subsuperfície (AUGUSTO FILHO e VIRGILI, 1998).

3.2.4 Clima

BONUCELLI (1999) apresenta as características do meio físico que favorecem os movimentos de massa gravitacionais, descritas a seguir:

- A alteração dos parâmetros de resistência mecânica dos solos da origem à: diminuição da coesão aparente dos materiais;
- O aumento da solicitação externa da origem ao aumento do peso específico dos materiais constituintes das vertentes;
- Com o avanço da frente de saturação no maciço, ocorre o desenvolvimento de poro-pressão positivas nos solos, sub pressões nas descontinuidades rochosas e forças de percolação.

3.2.5 Vegetação

Segundo o descrito por GERSCOVICH (2012) no seu livro de Estabilidade de Taludes, a cobertura vegetal pode produzir efeitos favoráveis ou desfavoráveis na estabilidade de vertentes. Em geral, a vegetação protege o solo dos efeitos climáticos e as raízes reforçam o solo, aumentando sua resistência no sistema solo/raiz. As áreas desmatadas ficam vulneráveis aos processos erosivos, além de receberem maiores volumes de água precipitada sobre a superfície da vertente.

3.2.6 Ação Antrópica

A ação antrópica pode se manifestar tanto como indutora de aumento de tensões cisalhantes mobilizadas, a partir de: execução de cortes com geometria incorreta (altura/inclinação); execução deficiente de aterros (geometria, compactação e fundações); lançamentos de lixo nas encostas. Como na redução da resistência ao cisalhamento, por: remoção da cobertura vegetal e lançamento e concentração de águas pluviais e/ ou servidas (GERSCOVICH, 2012).

3.3 Métodos de mapeamento de áreas instáveis

Para o mapeamento das áreas afetadas por movimentos de massa, SOETERS e VAN WESTEN (1996) sugerem as escalas e a resolução das áreas mínimas de análise (Tabela 6).

Tabela 6. Escalas utilizadas para o mapeamento em estudos de escorregamentos. FONTE: Adaptado de SOETERS e VAN WESTEN (1996).

CARACTERIZAÇÃO	ESCALAS	ÁREAS DE ESTUDO
Continental	1:1.000.000	250.000 km ²
Regional	1:100.000 a 1:500.000	2500 a 62500 km ²
Média	1:25.000 a 1:50.000	156,25 a 625 km ²
Grande	1:5000 a 1:15.000	6,25 a 56,25 km ²
Local	1:5.000 e maiores	< 6,25 km ²

O mapeamento de área a escala nacional é feito objetivando um inventário geral de áreas problemáticas no país inteiro. A escala regional é muito útil para o planejamento regional de áreas urbanas e rurais. Em escala média são feitos estudos em áreas com poucas centenas de quilômetros quadrados, que possuem construções de grandes estruturas, como rodovias.

A escala grande é usada para áreas de investigação que abrangem algumas dezenas de quilômetros quadrados, e exigem um número grande de informações. Já a escala local aplica-se quando se precisa de um detalhamento maior, como é o caso do trabalho em estudo, onde é preciso a localização de problemas locais, mais pontuais.

Em relação aos diferentes métodos e o tratamento das informações (Tabela 7 e 8), SOETERS e VAN WESTEN (1996) chamam a atenção para os seguintes enfoques no que diz respeito ao mapeamento e análise de estabilidade das vertentes:

A. Análise de Inventário: baseado em métodos de cartografia indireta e quantitativos, tem por objetivo a realização de mapas que representem os eventos existentes em termos de distribuição espacial, tamanho, forma e estado da densidade. O mapa é construído com as informações obtidas em campo e na fotointerpretação, onde são identificadas as cicatrizes deixadas nas vertentes pelos movimentos de massa.

B. Enfoque heurístico: baseado em métodos diretos e mapas de combinação qualitativa de cartografia, através da análise geomorfológica e a combinação de mapas temáticos. No mapeamento direto ou análise geomorfológica, o grau de risco é determinado diretamente no campo através do mapeamento de detalhe, baseado na experiência individual do analista.

No mapeamento indireto ou de combinação qualitativa de mapas o analista usa o conhecimento para assinalar pesos maiores para as classes e parâmetros mais relevantes no zoneamento de instabilização de encostas.

C. Enfoque estatístico (análise bivariada e multivariada): baseado em métodos indiretos e quantitativos, onde são determinadas estatisticamente as combinações de fatores que propiciaram a ocorrência de movimentos de vertentes no passado, inferindo que esses fatores serão os mesmos que gerarão instabilidade no futuro.

D. Enfoque determinístico: baseado em métodos indiretos e quantitativos, onde são aplicados modelos matemáticos de base física relacionando modelos de estabilidade de vertentes com modelos hidrológicos através de equações matemáticas.

As informações obtidas utilizando este enfoque são validadas pelo cruzamento com inventários de movimentos de massa de vertentes com o objetivo de representar espacialmente o comportamento dos processos que atuam no ambiente físico. A representação espacial é feita utilizando ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), onde o resultado final é um valor numérico. Como exemplo, podemos citar os modelos de estabilidade de taludes, resultando no cálculo de fatores de segurança (FERNANDES *et al.* 2001).

A principal desvantagem de aplicar este método é o alto grau de simplificação em mapeamentos a escalas médias e pequenas, devido á grande variabilidade dos parâmetros geotécnicos. Assim, a aplicação dos métodos determinísticos é aplicável somente em áreas com condições geológicas e geomorfológicas homogêneas, com ocorrência de escorregamentos simples, usualmente escorregamentos translacionais fazendo uso do modelo de talude finito.

A descrição deste método enquadra-se dentro das características da área que serão estudadas neste trabalho, pelo que será o método utilizado para determinar a suscetibilidade das vertentes do trecho em estudo.

O tratamento das informações relacionado aos diferentes métodos de avaliação da suscetibilidade descritos por SOETERS e VAN WESTEN (1996) pode ser observado na Tabela 7.

Onde, para cada tipo de análise são descritas as técnicas de aplicação e as escalas de mapeamento recomendadas, assim como os dados necessários descritos na Tabela 8.

Tabela 7. Técnicas de análise dos dados em função da escala de mapas. FONTE: Modificado de SOETERS e VAN WESTEN (1996).

TIPO DE ANÁLISE	TÉCNICA	CARACTERÍSTICAS	DADOS NECESSÁRIOS	ESCALAS RECOMENDADAS		
				Regional	Média	Grande
Inventário	Distribuição dos escorregamentos	Análise da distribuição e classificação	3	sim	sim	sim
	Atividades dos escorregamentos	Análise das mudanças do padrão temporal	4, 5, 14, 15, 16, 17	não	sim	sim
	Densidade dos escorregamentos	Cálculo das densidades nas unidades de terreno ou mapa de isopletas	1, 2, 3	Sim	não	não
Heurísticas	Geomorfológica	Usa observações de campo do perito no zoneamento	2, 3, 4	sim	sim	sim
	Combinação qualitativa	Perito fornece ponderação de valores dos mapas	2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18	sim	sim	não
Estatísticas	Bivariada	Calcula a importância da combinação de fatores	2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18	não	sim	não
	Multivariada	Calcula a fórmula de previsão a partir de uma matriz de dados	2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18	não	sim	não
Determinísticas	Fator de segurança	Aplicada a modelos de hidrologia e estabilidade de taludes	6, 11, 12, 13, 16, 20, 21, 22, 23	não	não	sim

Tabela 8. Levantamento de dados para análise de zoneamento nos estudos de escorregamento. FONTE: Modificado de SOETERS e VAN WESTEN (1996)

Geomorfologia	Engenharia geológica	Hidrologia
1- Mapeamento de unidades de terreno 2- Unidades e subunidades geomorfológicas 3- Escorregamentos recentes 4- Escorregamentos antigos	10- Litologia 11- Sequência de materiais 12- Mapa Geológico estrutural 13- Acelerações sísmicas	18- Drenagem 19- Bacia hidrológica 20- Regime de chuvas 21- Temperatura 22- Evapo transpiração 23- Mapa do nível de água
Topografia	Uso do solo	
5- Modelo digital do terreno 6- Mapa de declividades 7- Mapa de direção dos taludes 8- Comprimento do talude 9- Concavidade / convexidade	14- Infra-estrutura recente 15- Infra-estrutura antiga 16- Mapa de uso do solo recente 17- Mapa de uso do solo antigo	

3.4 Métodos de análise da estabilidade de vertentes

Para atingir o objetivo principal proposto neste trabalho, como é avaliar de suscetibilidade das vertentes através do cálculo dos índices de segurança da área estudada, serão aplicados modelos matemáticos determinísticos, baseados na teoria de equilíbrio limite.

O método de análise por “equilíbrio limite” baseia-se em diagnosticar o quão próximo do ponto de ruptura uma vertente se encontra. Para isso, considera-se a existência de uma condição de equilíbrio numa massa de solo com a qual é possível comparar a estado no qual a vertente se encontra. As condições de estabilidade são dadas por um fator de segurança (F_s), que representa a razão das forças favoráveis ao movimento pelas resistentes ao movimento. Enquanto as primeiras não ultrapassem as segundas o solo não se moverá.

Serão consideradas na análise da estabilidade a declividade das vertentes, os parâmetros de resistência dos solos e a espessura. No que diz respeito à cobertura vegetal, serão consideradas a ação da força do vento e o peso das árvores.

A equação do fator de segurança (F_s) utilizada foi a constante no capítulo 9 (Intensidade da chuva e escorregamentos) do livro "Fundamentos de Mecânica dos solos e das rochas", 2ª Ed. FIORI e CARMIGNANI (2009), Equação 9-22.

Segundo FIORI e CARMIGNANI (2009), desde o ponto de vista teórico, uma vertente se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de forças distintos: forças devidas ao peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento. O estudo de estabilidade em vertentes deve levar em conta o equilíbrio entre essas três forças, uma vez que as duas primeiras se somam, e tendem deslocar a massa de solo encosta abaixo (atuando como forças solicitantes), enquanto a última atua como freio a essa movimentação (atuando como força resistente).

A análise do equilíbrio-limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura ou o movimento são balanceadas pelas forças resistentes. Como exemplo, considere-se um bloco apoiado sobre um plano inclinado de ângulo atrito “ i ” (Figura16).

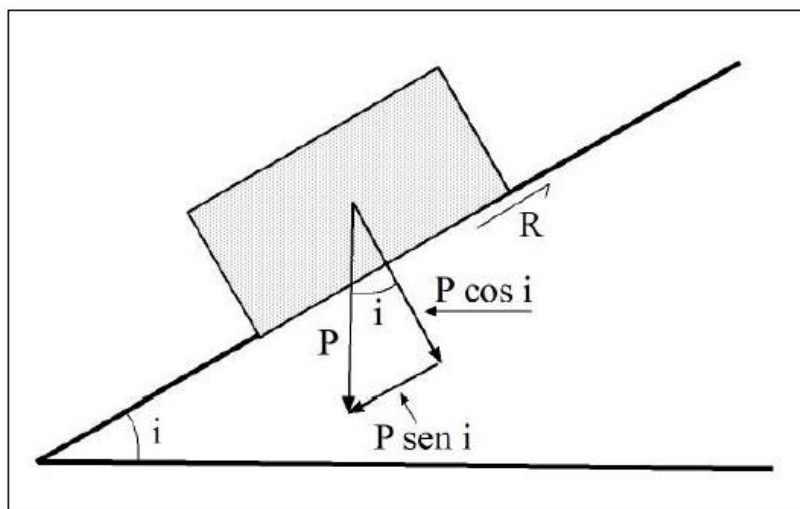


Figura 16. Decomposição da força (P) em sua componente tangencial e normal, e a força de resistência (R). FONTE: FIORI e CARMIGNANI (2001).

Onde o bloco é solicitado por seu próprio peso P, e a componente tangencial ($P \sin i$) tende a causar movimento. A componente normal, atuante perpendicularmente à base do bloco ou à superfície de escorregamento é igual a ($P \cos i$).

A força resistente à movimentação (R) é dada por $R = \tau A$, onde (τ) é a resistência ao cisalhamento do contato bloco/plano inclinado e pela Lei de Coulomb, $\tau = c + \sigma \tan \phi$, onde (c) é a coesão e (ϕ) é o ângulo de atrito interno, no contato bloco/superfície de apoio.

Na condição de equilíbrio limite e, para $c=0$, o fator de segurança (F_s) é igual à unidade, pois $i = \phi$. Valores de (F_s) maiores que a unidade, e, portanto, com $i < \phi$, indicam que as forças resistentes ao cisalhamento são maiores que as solicitantes ou favoráveis ao deslocamento. Assim, a vertente estará em equilíbrio. O seja, para uma vertente estar em condição de equilíbrio, deve ter $i = \phi$. Valores de F_s menores que a unidade e, portanto, $i > \phi$, indicam que as forças solicitantes são maiores que as resistentes e as vertentes estarão em desequilíbrio.

A fim de comparar a estabilidade de taludes em condições diferentes de equilíbrio- limite define-se um fator de segurança (F_s), como a razão entre a resultante das forças resistentes ao escorregamento e a resultante das forças solicitantes ou favoráveis ao movimento. O fator de segurança (F_s) é dado pela equação 1:

$$F_s = \frac{\text{forças resistentes}}{\text{forças solicitantes}}$$

Equação 1

Ao substituir os respectivos valores na equação 2, o fator de segurança bem dado por:

$$F_s = \frac{P \cos i \tan \phi}{P \sec i} = \frac{\tan \phi}{\tan i} \quad \text{Equação 2}$$

3.4.1 Determinação de forças em vertentes de extensão ilimitada, com percolação de água paralelamente à vertente.

Do ponto de vista prático, qualquer vertente de grande extensão, e com perfis de solos essencialmente do mesmo tipo, pode ser considerado como um talude de extensão ilimitada (DUNN; ANDERSON; KIEFER, 1980).

Neste tipo de análise de vertentes de extensão ilimitada, levam-se em consideração os efeitos da água dentro da vertente, que induz ao surgimento da força de percolação e da pressão neutra. Admite-se que as linhas de fluxo são paralelas à superfície da vertente, com linhas equipotenciais perpendiculares, como é observado de forma esquemática na Figura 17, onde o solo é considerado saturado, situação que ocorre na parte inferior de vertentes naturais. As vertentes da área em estudo enquadram-se nos termos deste item, compostas por solos homogêneos.

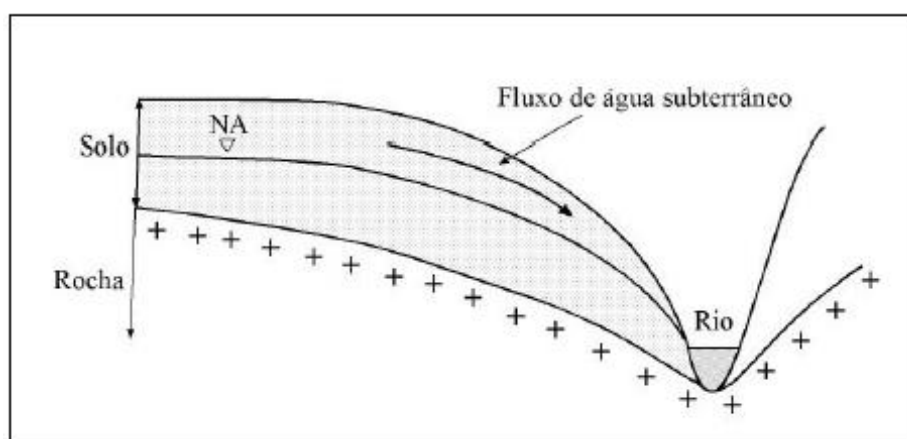


Figura 17. Fluxo da água em uma vertente natural. FONTE: FIORI e CARMIGNANI (2009).

A água que se precipita sobre o setor da bacia de drenagem se infiltra no solo, e quando esta é saturada completamente, inicia-se o processo de escoamento superficial

Na Serra do Mar, WOLLE e PEDROSA (1981) determinaram o valor da pressão (σ_a) em torno de 3,0 kPa.

b) Força do vento (F_{ve})

Esta força é considerada quando se tem a presença da vegetação em uma vertente, e é determinada através da razão entre a pressão exercida pelo vento (σ_{ve}), nas copas das árvores, com a área da vertente ($1/\cos i$), tendo-se a equação 4:

$$F_{ve} = \frac{\sigma_{ve}}{\cos i} \quad \text{Equação 4}$$

Esta força é relevante apenas quando a velocidade dos ventos de uma localidade excede a 40 km/h, conforme estimado por STYCZEN e MORGAN (1995). Através de medições de velocidades de ventos feitos na estação climatológica de Morretes, FENDRICH e FERREIRA (1995) estipulam uma média de 50,4 km/h. Com base nesses dados, NUNES (2002) determinou (σ_{ve}) igual a 1 kPa no município de Morretes.

Os resultados de (σ_a) 3,0 kPa obtidos por WOLLE e PEDROSA (1981) e de (σ_{ve}) 1 kPa obtidos por NUNES (2002), foram tomados como base para os cálculos relacionados com a vegetação deste trabalho.

Uma vez determinados todos os parâmetros de resistência dos solos, das características das vertentes e acrescidas as forças quando a cobertura vegetal está presente, o cálculo do Fator de Segurança (F_s) é fornecido pela seguinte equação 5:

$$F_s = \frac{C_s + \left[(\gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \tan \phi}{(h \gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

F_s = Fator de segurança;

C_s = Coesão do solo (kPa);

γ_{nat} = Peso específico natural do solo (kN/m³);

h_w = Altura da zona de solo saturado, perpendicular à vertente (cm);

h = Altura da zona de solo não saturado, perpendicular à vertente (cm);

γ_a = Peso específico da água (kN/m^3);

i = Inclinação da vertente (graus);

σ_a = Pressão exercida sobre a vertente pelo peso das árvores (kPa);

ϕ = Ângulo de atrito interno do solo (graus)

σ_{ve} = Pressão exercida pelo vento na cobertura vegetal (kPa).

Os resultados obtidos na aplicação do modelo matemático na análise de estabilidade foram especializados mediante o emprego de técnicas SIG, a seguir é descrito o procedimento.

3.5 Elaboração da base de dados em ambiente SIG

Na geração do bando de dados do presente estudo foi utilizado o *software* ArcInfo (ESRI, 2012) do ArcGis 10.1, o qual armazena os dados em uma estrutura de dados topológicos, obtidos nos mapas temáticos (declividade, curvatura, orientação de vertentes e solos). As informações obtidas no processamento são combinadas com os parâmetros geotécnicos dos solos obtidos dos dados das sondagens e da análise laboratorial das amostras indeformadas, como ângulo de atrito e coesão, e inseridos no modelo matemático adotado, através da equação do Fator de Segurança (Equação 5), para gerar os mapas de índice de segurança, variando o grau de saturação no solo (cenário com solo seco e 30 % de saturação), utilizando a base topográfica 1:25.000 (2002) na área toda e a restituição fotogramétrica 1:1.000 (2008) na faixa de domínio (200 m de cada lado da rodovia), onde é criado um novo nível de informação. A validação dos mapas é feita através da comparação dos mapas de fatores de segurança resultantes e o resultado do inventário de escorregamentos.

O fluxograma da Figura 19 apresenta a metodologia empregada no trabalho para a espacialização das equações do Fator de Segurança (Fs) utilizando o Sistema de Informações Geográficas (SIG), quando são empregadas técnicas geomorfométricas, tendo por base um Modelo Digital do Terreno (MDT).

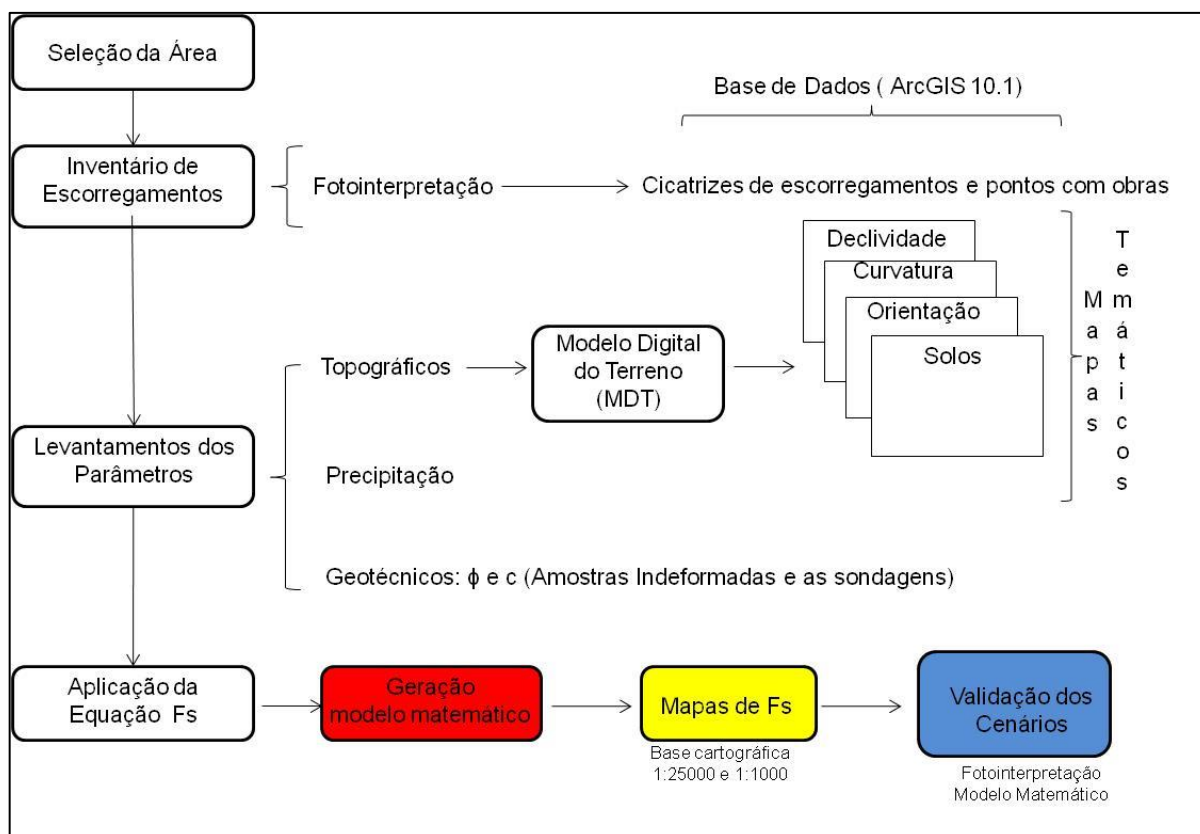


Figura 19. Metodologia empregada para gerar a base de dados digital em SIG.

A utilização de banco de dados digitais em ambiente SIG é outro grande aliado na aplicação de método determinístico (modelo matemático), pois permite lidar com uma gama de informações muito grande e processá-las a fim de gerar mapas de fatores de segurança que auxiliem na visualização e interpretação de áreas com maiores ou menores graus de estabilidade, além de atualizar e complementar as informações já existentes.

Algumas aplicações das técnicas de SIG para espacialização das equações de fator de segurança foram empregadas por Fiori (1995a), Fiori (1995b), Girardi (1999), Nunes (2002), Fiori e Nunes (2003), Amaral (2003), Borchardt (2005), Kosziak (2005), Tabalipa (2008) e Teixeira (2012).

4. HISTÓRICO DOS MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS NA REGIÃO

No inventário de escorregamentos foram utilizadas a fotografias aéreas do ano 1980, na escala 1:25.000, onde foram traçadas as feições que representavam movimentações, como cicatrizes de escorregamento. Também foram mapeados os

locais onde já foram executadas obras produto de escorregamentos antigos, como os retaludamentos observados na Figura 21.

Também é possível observar a correspondência de vários desses locais onde aconteceram escorregamentos e cicatrizes de escorregamentos com o mapeamento dos diques básicos presentes no local, extrapolados do mapa geológico, com orientação preferencial NW. Com auxílio da fotointerpretação foram interpretados novos diques básicos com orientação preferencial NW e NE, reconhecidos nas fotografias pelas suas feições suavemente destacadas no relevo.

Como o observado na Figura 21, o trecho da BR-376 em estudo foi alvo de vários acidentes por escorregamentos translacionais no mês de março do ano 2011, devido a eventos pluviométricos intensos com uma precipitação acumulada mensal maior que 700 mm. Estas informações foram obtidas através dos relatórios fornecidos pela ANTT, e serão descritas nos pontos a seguir.

km 659 + 270 (Pista Sul)

Neste local uma ruptura por escorregamento translacional atingiu uma extensão aproximada de 80 metros (ao nível da pista), com comprimento transversal de até 40 metros. A espessura máxima da ruptura foi de 5 metros, estimados a partir dos dados obtidos pelo levantamento topográfico (Figura 20).



Figura 20. a) Vista geral da ruptura em 15/03/2011 e b) Vista da trinca do topo da ruptura, no km 659+270m. FONTE: ANTT (2011)

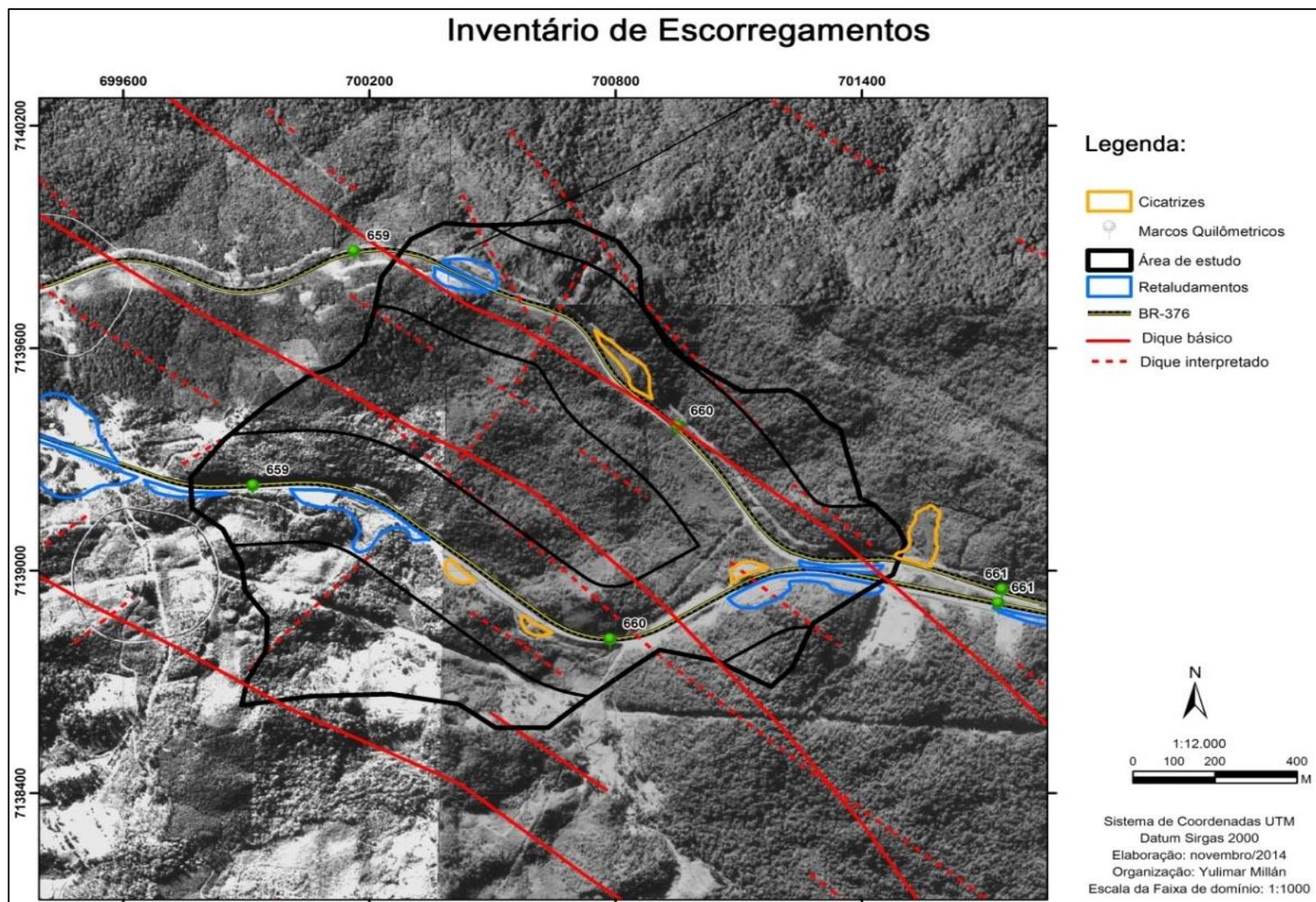


Figura 21. Relação dos escorregamentos com as estruturas no Inventário de Escorregamentos.

✓ **km 659 + 270 (Pista Norte)**

O talude nesta região foi acometido por escorregamentos translacionais e erosão superficial (Figura 22), relacionado a eventos pluviométricos ocorridos na região no mês de março de 2011 (>a 700mm). A água que infiltra reduz a resistência do solo e aumenta o peso de mesmo, propiciando movimentações, enquanto a água que escoar pela superfície causa a erosão superficial.



Figura 22. Ilustração dos movimentos ocorridos no talude, no topo escorregamento translacional e na base erosão superficial. FONTE: ANTT (2011)

✓ **km 660 + 440 (Pista Sul)**

Outra ruptura por escorregamento translacional no km 660 + 440 (Pista Sul), originado pelas chuvas intensas ocorridas ao leste do estado Paraná (Figura 23). Neste local, foi executado um reforço no topo do maciço com cortina atirantada.



Figura 23. Vista do solo escorregado que invadiu e obstruiu a pista sul no km 660 + 400m, da BR-376. FONTE: ANTT (2011)

✓ **km 660 + 570 (Pista Sul e Norte)**

Neste ponto a ruptura do aterro atingiu uma extensão aproximada de 30 metros (ao nível da pista), com comprimento transversal de até 25 metros, atingindo a pista sul. A espessura máxima da ruptura foi de 4 metros, estimada à partir dos dados obtidos pelo levantamento topográfico (Figura 24).



Figura 24. Localização dos eventos ocorridos. FONTE: ANTT (2011)

5. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS

Para determinar a caracterização dos tipos de solos, quanto a sua formação e rocha de origem em primeiro lugar foi feita uma descrição tátil – visual *in situ* dos tipos de solos presentes na área de estudo, seguido da locação para a coleta das quatro amostras indeformadas de solo. A coleta das amostras ocorreu entre os dias 12 e 21 de novembro do ano 2013, para esses dias o registro dos dados pluviométricos na região foi aproximadamente 150 mm de acumulação mensal.

As amostras coletadas foram ensaiadas em laboratório para a caracterização das propriedades geológicas – geotécnicas dos solos. Todos os procedimentos executados seguiram as orientações descritas pelas normas da ABNT NBR-6502 Rochas e Solos do ano 1995. Assim como a classificação dos solos adotada.

A norma descreve o solo residual, como solos formados *in situ* produto da decomposição da rocha matriz, quando sujeita à ação de intemperismo físicos ou químicos, estes solos podem ocorrer em vários estágios de evolução. Os solos coluvionares são os formados pela decomposição de partículas transportadas pela ação da gravidade.

Entre os ensaios de caracterização encontram-se: análise granulométrica, teor de umidade e limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade). Para o conhecimento das propriedades físicas dos solos, foram realizados ensaios de cisalhamento direto para a obtenção dos parâmetros de resistência, tais como: ângulo de atrito interno e coesão, além do ensaio para determinar os pesos específicos aparentes.

Também foram analisados os resultados de ângulo de atrito e coesão dos 16 pontos de sondagens, realizados pela ANTT (2011) e obtidos por retroanálises.

Seguem as descrições feitas em campo para coleta de amostras indeformadas e os resultados obtidos em laboratório.

5.1 Descrição dos solos *in situ* e coleta de amostras indeformadas

Durante as visitas de campo para o reconhecimento dos tipos de solos ao longo da rodovia, foram considerados dois tipos de solos principais: residuais e coluvionares. Destes solos foram coletadas quatro (04) amostras indeformadas em diferentes localidades e profundidade, 03 amostras correspondem a solos residuais de migmatito e 01 de solo coluvionar, conforme descrição na Tabela 9.

Tabela 9. Localização das amostras indeformadas

Amostra	km	Pista	Lado	Solo	Rocha de Origem	Cota	Coordenada	
							E	S
AI-01	659	S	LE	Residual	Migmatito	804	701199	7139033
AI-02	659	S	LD	Colúvio	Migmatito	801	701199	7139033
AI-03	659	N	LD	Residual	Migmatito	800	701387	7139099
AI-04	659	N	LD	Residual	Migmatito	818	701368	7139105

Na descrição *in situ* dos tipos de solos foi considerada sua textura, a cor e sua posição na vertente, buscando uma melhor compreensão das suas propriedades geológico-geotécnica e, conseqüentemente, das condições de estabilidade das vertentes que compõem a região.

Na área de estudo observaram-se dois tipos de solos principais: residuais e coluvionares.

De um modo geral, os solos residuais apresentam tonalidades amarelas e vermelhas, bastante argilosas, frequentemente evidenciando estruturas reliquias (granulometria de média a grosseira) da rocha matriz (migmatito/gnaiss), caracterizada por níveis de colorações esbranquiçadas, devido à maior concentração de minerais félsicos como feldspato e quartzo, e níveis de colorações vermelhos devido à maior concentração de minerais máficos na rocha matriz, como micas de tipo biotita e anfíbolitos.

A ocorrência de este tipo de solo está associada a um relevo fortemente ondulado, propiciando um maior escoamento superficial. Apresentam um grau de desenvolvimento que não é suficiente para decompor os minerais primários de fácil intemperização, como os feldspatos. Estão vinculados à resistência do material de origem, representado por litotipos de tipo migmatito e gnaiss.

Estes solos são encontrados com maior frequência e maiores espessuras em porções de meia encosta de relevos ondulados e suavemente ondulados, alcançando até cinco metros de espessura.

As Figuras 25 e 26 referem-se ao local de coleta das amostras de solo residual AI-03 e AI-04. No caso da amostra AI-03 a coleta foi feita parede de escavação uma profundidade de 2,3 m, e no caso da amostra AI-04 a amostra foi coleta a 1 m de profundidade.

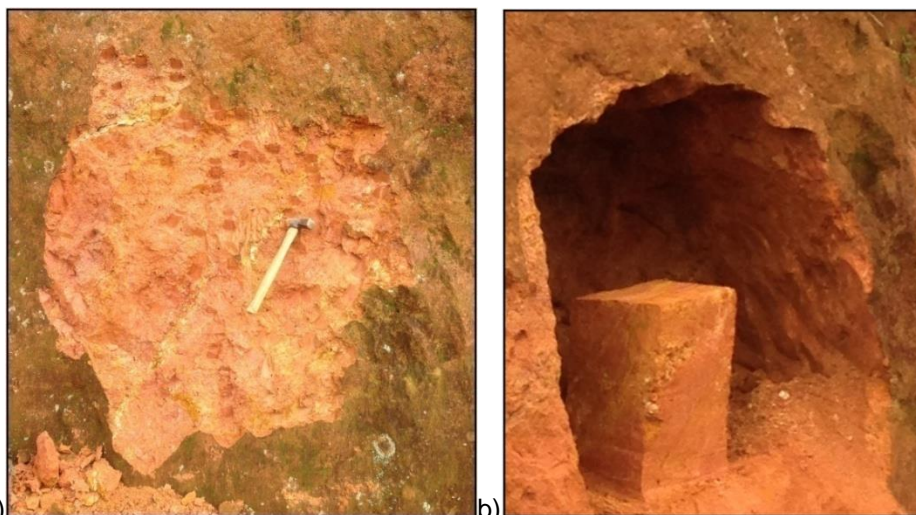


Figura 25. a) Solo residual de migmatito/gnaiss; e b) detalhe da retirada da amostra indeformada na parede.



Figura 26. Solo residual de migmatito/gnaiss da amostra AI-04.

No que se refere aos solos coluvionares, caracterizam-se por um pequeno acúmulo de matéria orgânica e pelas tonalidades entre marrom avermelhada ou amarelada, tipo tijolo, de matriz predominantemente argilo-arenosa com fragmentos de rocha dispersos e sem evidência das estruturas reliquias da rocha matriz.

Estão localizadas principalmente nos topos aplainados das vertentes e nas porções inferiores das vertentes (aproximadamente um terço da vertente), sobre solos residuais, havendo em alguns casos, boa marcação na transição entre ambos, especialmente por uma brusca mudança de coloração. A espessura deste tipo de solo é bastante irregular.

A amostra coletada neste tipo de solo coluvionar foi a AI-02 a uma profundidade de 1 metro, na Figura 27 é possível diferenciar o contacto entre o solo coluvionar e o solo residual do migmatito marcado pela linha pontuada amarela.



Figura 27. Contacto entre o solo coluvionar e o residual na coleta das amostras AI-01 e AI-02

A amostra AI-01 correspondente ao solo residual foi tomada no nível inferior da amostra AI-02 a uma profundidade aproximada de 1,5 metros, esta amostra apresenta as mesmas características que as amostras AI-03 e AI-04 descritas anteriormente.

Em menor proporção e de forma muito restrita ocorre os solos aluvionares, associados ao canal principal na parte do médio curso do rio São João. São constituídos por sedimentos de deposição fluvial, predominando termos arenosos.

A localização das amostras indeformadas e dos pontos de sondagens foi espacializada e estão disponíveis na Figura 28. No caso das amostras indeformadas, a escolha do ponto de coleta foi baseada no tipo de solo, priorizando solos distintos e na viabilidade de acesso ao local. Já nas amostras de sondagens, segundo os relatórios da ANTT (2012) a escolha foi baseada nos pontos com histórico de escorregamentos.

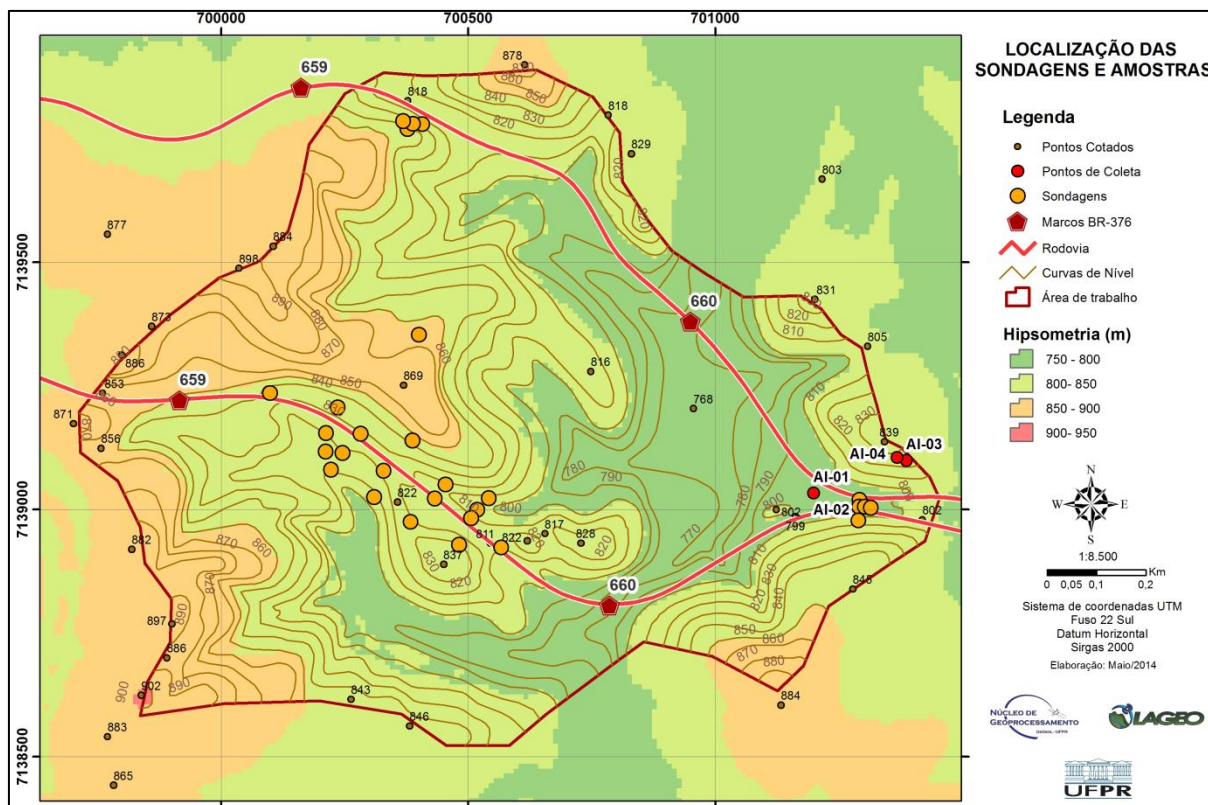


Figura 28. Localização dos pontos de sondagens e das amostras indeformadas

5.2. Ensaios de laboratório

5.2.1 Ensaios de caracterização dos solos – Amostras indeformadas

Todos os procedimentos realizados na execução dos ensaios de caracterização obedeceram às orientações das normas da ABNT, descritas no Capítulo 1 de Materiais e Métodos.

5.2.1.1 Granulometria

A análise granulométrica mostra em porcentagem os diferentes tamanhos de grãos que compõe o solo. Na Tabela 10 é possível observar os resultados obtidos no ensaio e nas Figuras 29 a 34 são ilustradas parte dos procedimentos executados e os gráficos resultantes.

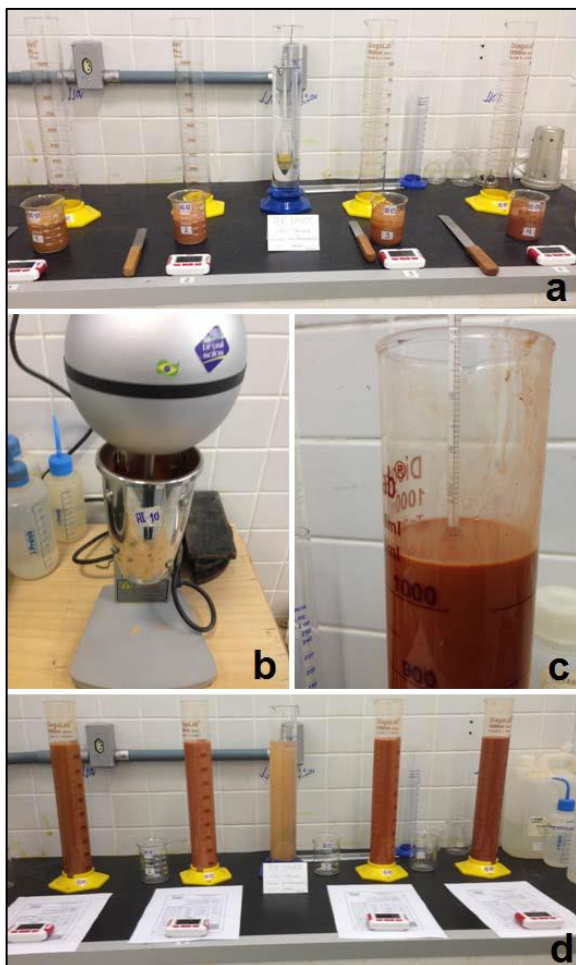


Figura 29. Etapas do processo de sedimentação: a) Béquer de vidro de 250 cm³, contendo 120 g do material passado na peneira de 2,00 mm e 125 cm³ do defloculante composto pela concentração de 45,7 ml de hexametáfosfato de sódio; b) Aparelho de dispersão onde a amostra é colocada por 15 min; c) Transferência da dispersão para a proveta de vidro de 1000 cm³ onde é acrescentada com água destilada e medida sua temperatura; d) Provetas de vidro de 1000 cm³ contendo o material das 4 amostras onde são efetuadas leituras de sedimentação a cada 0,5, 1, 2, 4, 8 e 30 min e 1, 2, 4, 8 e 24 horas.



Figura 30. Peneiramentos separando os grãos finos e grossos

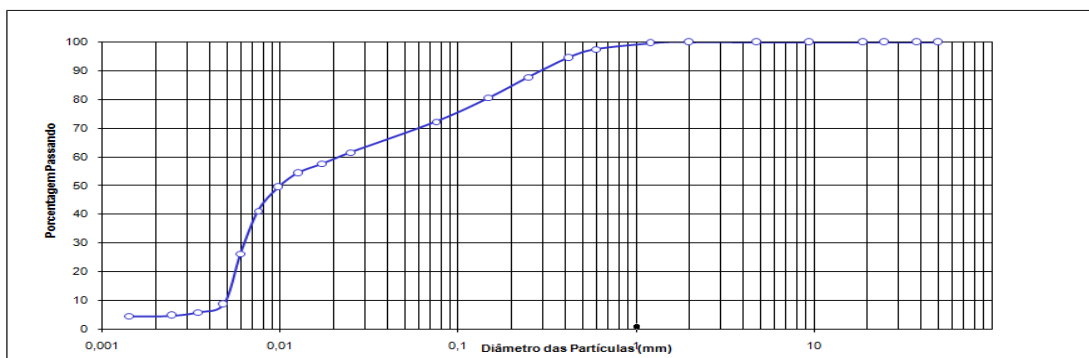


Figura 31. Curva granulométrica da amostra AI-01

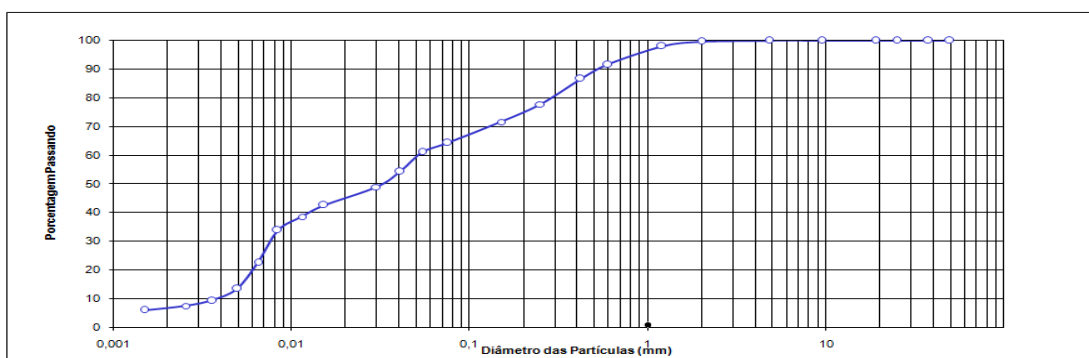


Figura 32. Curva granulométrica da amostra AI-02

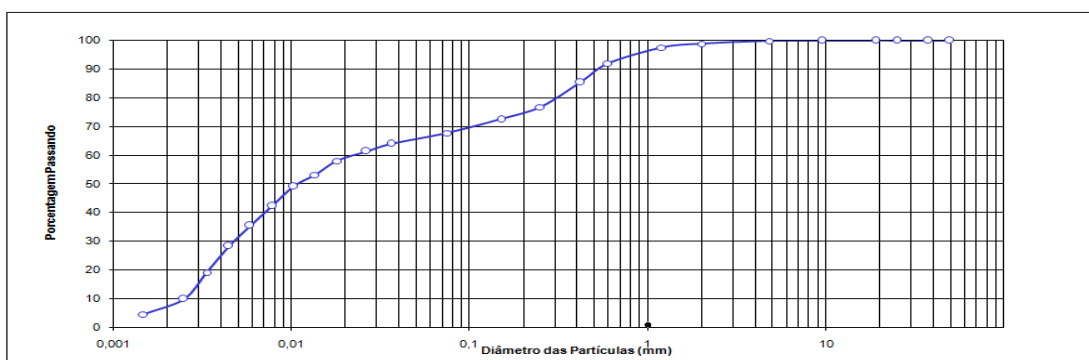


Figura 33. Curva granulométrica da amostra AI-03

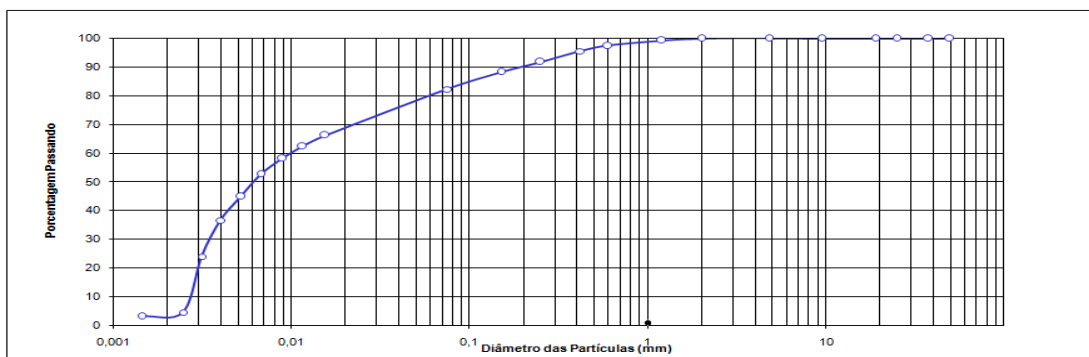


Figura 34. Curva granulométrica da amostra AI-04

Os resultados da análise granulométrica mostraram que os solos são compostos, principalmente por silte (62%) e areia (31%), o que permite a classificação do solo, segundo a norma como silte arenoso (Tabela 10).

Tabela 10. Resultados da análise granulométrica

SOLO	AMOSTRA	PEDREGULHO (60 - 2,0 mm)	AREIA (2,0 - 0,06mm)	SILTE (0,06 - 0,002mm)	ARGILA (<0,002mm)	CLASSIFICAÇÃO ABNT
Residual Migmatito/ gneisses	AI-01	0	32,1	63,3	4,6	Silte Arenoso
Colúvio	AI-02	0,4	37,6	55,3	6,7	Silte Arenoso
Residual Migmatito/ gneisses	AI-03	1,2	32,3	59,22	1,27	Silte Arenoso
	AI-04	0,1	25,6	71,07	3,2	Silte Arenoso

5.2.1.2 Teor de Umidade ou umidade natural (h)

O teor de umidade (h), também chamado de umidade natural, é a razão entre o peso da água contida em uma massa de solo e o peso dos sólidos que a compõe. Os valores resultantes da umidade (h) das amostras de solo podem ser vistos na Tabela 11, onde se verifica que o menor valor encontrado foi na amostra AI-02 (19,31%) e o maior valor (26,61 %) na amostra AI-04.

Tabela 11. Resultado do teor de umidade

AMOSTRA	UMIDADE NATURAL (%)
AI-01	25,6
AI-02	19,31
AI-03	23,46
AI-04	26,61

5.2.1.3 Limite de Atterberg (LL e LP)

O limite de liquidez (LL) define o teor de umidade acima do qual o solo deixa de ter comportamento líquido e passa ao estado plástico. Os valores resultantes têm máximos e mínimos, respectivamente, 32 e 26 %, com um valor médio de 29 %.

O limite de plasticidade (LP) define o teor de umidade acima do qual o solo deixa de ter comportamento plástico e passa a ter comportamento semis-sólido.

Os valores resultantes têm máximos e mínimos respectivamente de 28% e 24%, com um valor médio de 26%.

A diferença entre e LL e LP é o índice de plasticidade (IP), cujo valor fornece informações acerca da amplitude da faixa de plasticidade de um solo (Tabela 12). Ou seja, quando maior for o IP mais plástico será o solo, o que origina maiores problemas relacionados ao seu uso como matéria prima para a engenharia.

Tabela 12. Resultados da análise dos limites de Atterberg

AMOSTRA	LL (%)	LP (%)	IP
AI-01	30,21	28,54	1,67
AI-02	26,84	24,59	2,25
AI-03	29,83	28,22	1,61
AI-04	32,2	27,83	4,37

Os valores de LL resultantes ficaram na faixa de 26 e 32 %, com valor médio de 29% enquanto os valores de LP ficaram na faixa de 24 e 28%, com valor médio de 26%, sendo considerados como solos com baixa compressibilidade e baixa plasticidade. Na Figura 35 mostra-se parte do procedimento do ensaio.



Figura 35. Ensaio de limite de plasticidade no aparelho de Casagrande.

Os dados obtidos estão representados no gráfico de plasticidade de Casagrande, onde se pode observar que todas as amostras encontram-se abaixo da linha “A”, a qual delimita os solos argilosos e siltosos. Todas as amostras se

encontram ao lado esquerdo da linha “B”, com porcentagem de Limite de Liquidez menor de 50%, sendo considerados como solos com baixa compressibilidade e baixa plasticidade como se pode ver nas Figuras 36 e 37.

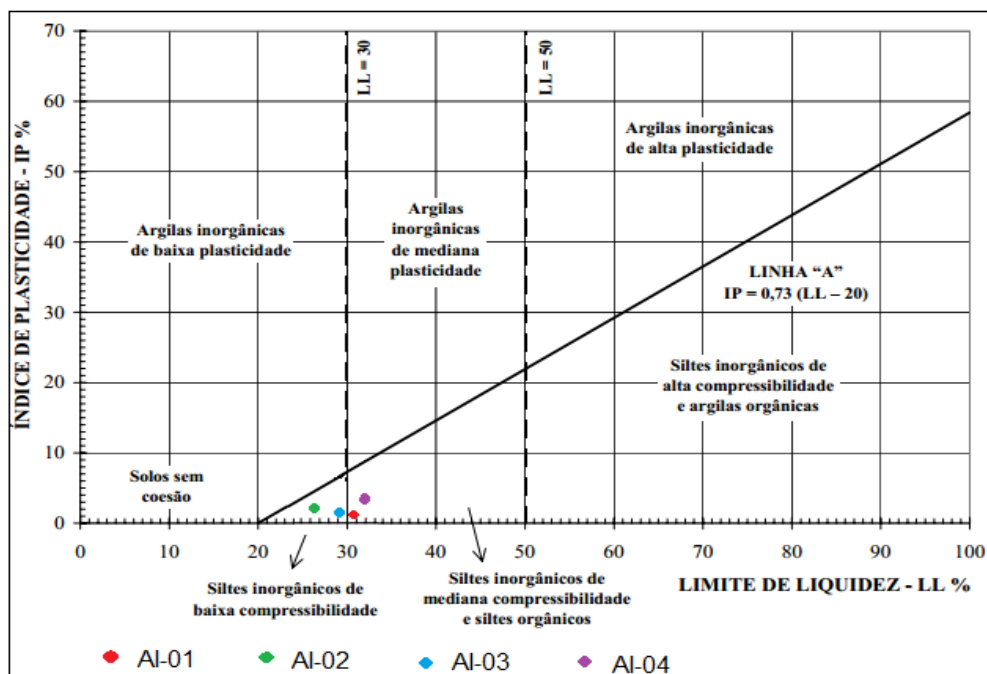


Figura 36. Gráfico de Plasticidade de Arthur Casagrande para as amostras de solo em estudo

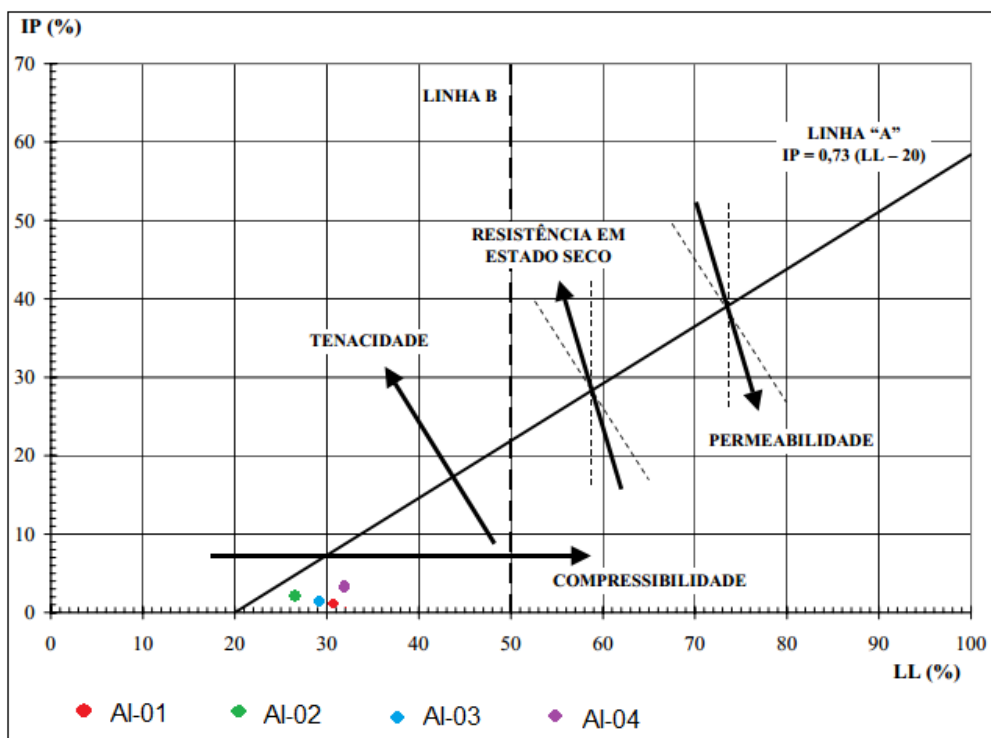


Figura 37. Gráfico de plasticidade de Casagrande. Direção da variação de permeabilidade, compressibilidade, tenacidade (plasticidade) e resistência no estado seco dos solos presentes na região.

5.2.2 Ensaios de cisalhamento direto.

Neste item serão analisados os valores de peso específico (γ_{nat}), ângulo atrito (ϕ) e coesão das amostras indeformadas coletadas e os dados dos sondagens fornecidos pela ANTT (2011).

5.2.2.1 Peso Específico dos solos (γ_{nat})

O peso específico é a razão entre o peso da amostra de solo coletada pelo volume da mesma. A massa específica dos solos (ρ_{nat}) expressa em g/cm^3 multiplicada pela aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$) dá como resultado o peso específico (γ_{nat}), expresso em kN/m^3 . Os resultados obtidos das amostras ensaiadas estão apresentados na Tabela 13 e na Figura 38 podem observam-se parte do procedimento do ensaio.

Tabela 13. Valores de ρ_{nat} e γ_{nat} das amostras indeformadas

AMOSTRA	MASSA ESPECÍFICA ρ_{nat} (g/cm^3)	PESO ESPECÍFICO γ_{nat} (KN/m^3)
AI-01	1,74	17,14
AI-02	1,76	17,25
AI-03	1,72	16,93
AI-04	1,76	17,27/



Figura 38. a) Picnômetro com as amostras no ensaio de massa específica; b) Pesagem do picnômetro com as amostras.

5.2.2.2 Ângulo de atrito e coesão obtidos pelos SPT

A coesão é apresentada como uma força de resistência do solo ao cisalhamento. De acordo com SELBY (1993), quanto menor o raio das partículas do solo, maior a capilaridade do solo e maior a coesão do mesmo.

O ângulo de atrito interno corresponde ao ângulo de inclinação da linha de resistência ao cisalhamento (Mohr–Coulomb) em relação ao plano na horizontal.

Com a finalidade de compreender as características geológicas – geotécnicas nas áreas de ruptura, foram utilizados os resultados das planilhas de sondagens a percussão (SPT) fornecida pela ANTT, executados anos anteriores (2011 até 2012) e apresentados em relatórios.

A seguir é apresentada a metodologia e as equações que foram utilizadas por vários autores e aplicados neste trabalho para a estimativa dos parâmetros geotécnicos do solo, como o ângulo de atrito e coesão, com base na profundidade e nos valores de N_{SPT} (número de golpes) constantes nas planilhas de sondagens.

Em um primeiro momento, o N_{SPT} foi corrigido quanto à eficiência e à tensão confinante para uma tensão de referência de 100 kPa (N_1).

Para tal, foi necessário determinar a tensão vertical efetiva (σ_v') e o coeficiente de correção (CN) através das seguintes equações:

Tensão efetiva: (LIAO e WITHMAN, 1986)

$$\sigma_v' = Z \times \gamma_{nat} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: Z = altura ou profundidade; e γ_{nat} = peso específico do solo natural

Coeficiente de correção: (LIAO e WITHMAN, 1986)

$$CN = \sqrt{\frac{100}{\sigma_v'}} \quad \text{Equação 8}$$

Valor do N_{SPT} corrigido: (LIAO e WITHMAN, 1986)

$$N_1 = N_{spt} \times CN \quad \text{Equação 9}$$

Onde: N_{spt} = número de golpes; e CN o coeficiente de correção

O próximo passo é corrigir o N_{SPT} para um valor de penetração de referência, normalizado com base no padrão americano de N_{60} , onde a energia liberada é de aproximadamente 60% (SCHNAID, 2000).

$$N_{60} = \frac{N_{spt} \times \text{Energia aplicada}}{0,60} \quad \text{Equação 10}$$

Para materiais granulares, HATANAKA & UCHIDA (1996) propõe uma correlação direta com o NSPT corrigido em relação à energia aplicada ao sistema e ao nível de tensões $(N_1)_{60}$.

$$\phi = 20 + (15,4 \times (N_1)_{60})^{1/2} \quad \text{Equação 11}$$

Quando se trata de materiais coesivos, o parâmetro a ser determinado é a resistência não drenada (S_u), determinada a partir da equação de STROUD (1989), onde:

$$S_u = 5 \times N_{60} \text{ (kPa)} \quad \text{Equação. 12}$$

Em materiais coesivos - friccionais os parâmetros a serem obtidos são coesão (c') e o ângulo de atrito (ϕ). Para obter estes parâmetros, a partir de $\phi_{(N_1)60}$ foi estimado um valor para a resistência ao cisalhamento de um material puramente friccional, pela seguinte equação:

$$\tau = \sigma_v' \times \tan \phi_{(N_1)60} \quad \text{Equação 13}$$

E então, supondo um material coesivo- friccional com esta mesma resistência ao cisalhamento fixou-se um valor de ϕ' para obter-se o valor de c' , pela equação:

$$c' = \tau - \sigma_{v0}' \times \tan \phi \quad \text{Equação 14}$$

Nos resultados dos parâmetros de resistência calculados através das planilhas de sondagens fornecidas, foram consideradas apenas as informações dos primeiros três metros de profundidade dos 19 pontos selecionados, já que as amostras indeformadas foram coletadas numa profundidade máxima de 2,3 metros, descritos a seguir:

✓ **km 658+400 m (Pista Sul)**

Segundo os levantamentos da ANTT em março do ano 2011, a área foi afetada por um escorregamento translacional, associado a um episódio de pluviosidade intensa ocorrido na região (>700 mm), desta forma a presença da água é relevante no processo de instabilidade.

As três sondagens realizadas indicaram que o talude é constituído por argila siltosa, eventualmente com presença de pedregulhos, de coloração marrom nos primeiros metros, passando variegada a profundidades maiores, como se pode observar na Figura 39, correspondente ao perfil geológico-geotécnico do talude.

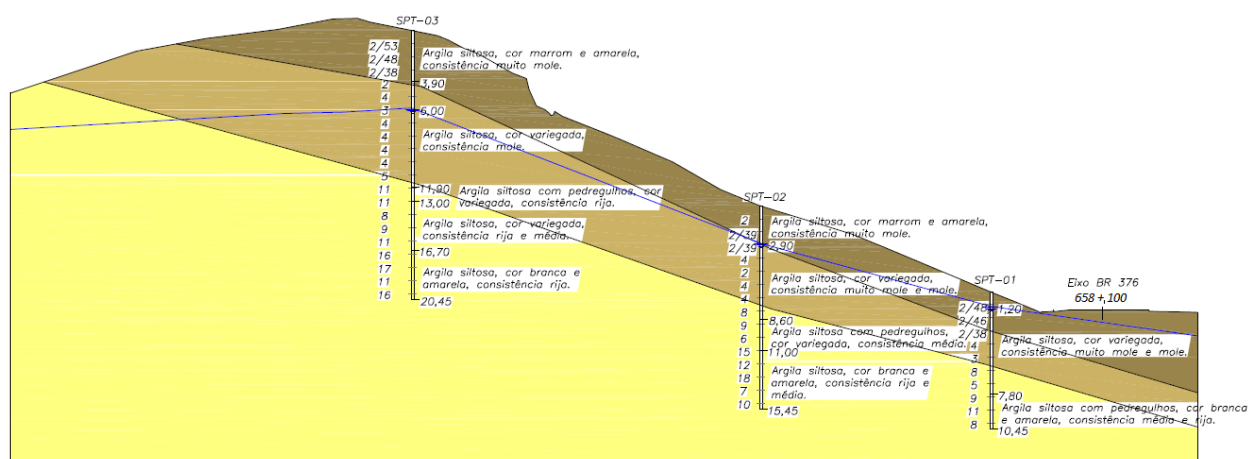


Figura 39. Perfil Geológico - Geotécnico do talude no km 658 + 400 m - Pista Sul. FONTE: ANTT (2012).

A resistência nos primeiros quatro metros é muito baixa, com NSPT de no máximo 2. Foi identificado nível de água em todas as sondagens, desde 1,2m de profundidade junto ao pé do corte no SPT-01 até 6m de profundidade junto ao topo da ruptura no SPT-03.

Os resultados dos parâmetros de resistência obtidos mediante o uso das equações do item 5.2.2.2, são apresentados na Tabela 14. Os valores destes parâmetros ficaram muito próximos, com valores de ângulo de atrito mínimos 26,12° e máximos de 29,20°, a coesão mínima de 0,66 kPa e máxima 1,48 kPa.

Tabela 14. Resultados dos parâmetros de resistência no km 658+400m.

Local	Amostra	z (m)	Nspt	Y _{nat} (kN/m ³)	σ' _v (kPa)	Liao e Whitman, 1966				Hatanaka & Uchida, 1966			Descomposição em c' e φ	
						CN	N ₁	N ₆₀	(N ₁) ₆₀	φ (N ₁) ₆₀	Su (kPa)	τ (kPa)	φ (fixo - menor valor calculado)	c' (kPa)
Km 658 + 400	SPT 01	1,0	1,25	18,00	16,00	2,50	3,13	1,38	3,44	27,28	6,88	8,25	25,00	0,79
		2,0	1,30	18,00	32,00	1,77	2,30	1,43	2,53	26,24	7,15	15,77	25,00	0,85
		3,0	1,58	18,00	48,00	1,44	2,28	1,74	2,51	26,22	8,69	23,64	25,00	1,25
	SPT 02	1,0	2,00	18,00	16,00	2,50	5,00	2,20	5,50	29,20	11,00	8,94	25,00	1,48
		2,0	1,54	18,00	32,00	1,77	2,72	1,69	2,99	26,79	8,47	16,16	25,00	1,24
		3,0	1,54	18,00	48,00	1,44	2,22	1,69	2,45	26,14	8,47	23,55	25,00	1,17
	SPT 03	1,0	1,13	18,00	16,00	2,50	2,83	1,24	3,11	26,92	6,22	8,12	25,00	0,66
		2,0	1,25	18,00	32,00	1,77	2,21	1,38	2,43	26,12	6,88	15,69	25,00	0,77
		3,0	1,58	18,00	48,00	1,44	2,28	1,74	2,51	26,22	8,69	23,64	25,00	1,25

✓ **km 659 + 270 m (Pista Norte)**

Neste ponto foram realizadas três sondagens de simples reconhecimento. A localização destes pontos é apresentada na Figura 40.

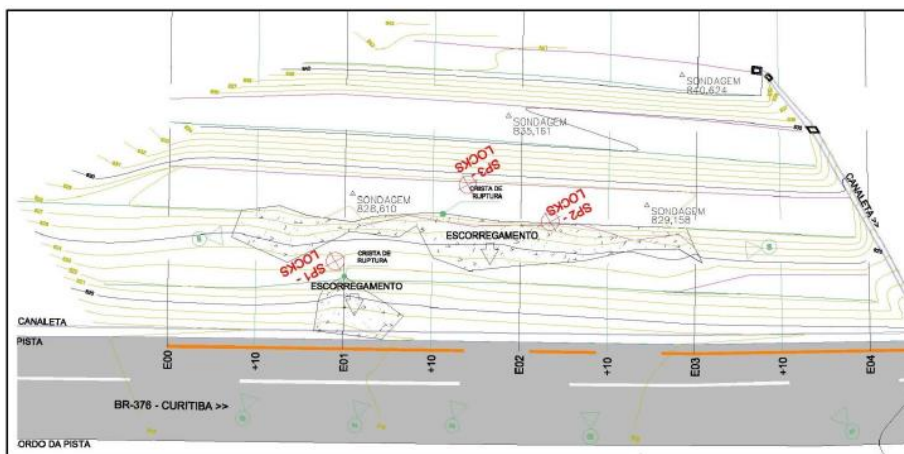


Figura 40. Localização dos pontos de sondagens no talude, km 659+270m. FONTE: ANTT (2012).

Os resultados dos parâmetros de resistência obtidos mediante o uso das equações no item 5.2.2.2, são apresentados a continuação na Tabela 15.

Tabela 15. Resultados dos parâmetros de resistência no km 659+270m.

Local	Amostra	z (m)	Nspt	Y _{nat} (kN/m ³)	σ' _v (kPa)	Liao e Whitman, 1966				Hatanaka & Uchida, 1966			Descomposição em c' e φ	
						CN	N ₁	N ₆₀	(N ₁) ₆₀	φ (°)	Su (kPa)	τ (kPa)	φ (°)	c' (kPa)
Km 659+270	S O P T 1	1,0	12,00	18,00	18,00	2,36	28,28	13,20	31,11	41,89	66,00	16,14	38,00	2,08
		2,0	16,00	18,00	36,00	1,67	26,67	17,60	29,33	41,25	88,00	31,58	38,00	3,45
		3,0	18,00	18,00	54,00	1,36	24,49	19,80	26,94	40,37	99,00	45,91	38,00	3,72
	S O P T 2	1,0	7,00	18,00	18,00	2,36	16,50	7,70	18,15	36,72	38,50	13,43	31,00	2,61
		2,0	8,00	18,00	36,00	1,67	13,33	8,80	14,67	35,03	44,00	25,23	31,00	3,60
		3,0	9,00	18,00	54,00	1,36	12,25	9,90	13,47	34,40	49,50	36,98	31,00	4,53
	S O P T 3	1,0	11,00	18,00	18,00	2,36	25,93	12,10	28,52	40,96	60,50	15,62	26,00	6,84
		2,0	10,00	18,00	36,00	1,67	16,67	11,00	18,33	36,80	55,00	26,93	26,00	9,38
		3,0	8,00	18,00	54,00	1,36	10,89	8,80	11,98	33,58	44,00	35,85	26,00	9,51

Nestes pontos os valores de ângulo atrito e coesão apresentaram uma grande variação, obtendo-se valores de coesão mínimos de 2,61 kPa, médias de 5,08 kPa e máximos de 9,58 kPa. Os valores ângulo de atrito ficaram entre 33,58° os mínimos com uma média de 37,08° e máximos de 41,89°.

✓ **Km 660 + 400 m (Pista Sul)**

As cinco sondagens feitas mostram valores de ângulo de atrito mínimos de 26,79° e máximos de 36,80°, de coesão entre 1,26 kPa os mínimos e 9,51 kPa os máximos (Tabela 16).

Tabela 16. Resultados dos parâmetros de resistência do km 660+400m.

Local	Amostra	z (m)	Nspt	Ynat (kN/m ³)	σ'v (kPa)	Liao e Whitman, 1966				Hatanaka & Uchida, 1966		Descomposição em c' e φ		
						CN	N ₁	N ₆₀	(N ₁) ₆₀	φ (N ₁) ₆₀	Su (kPa)	τ (kPa)	φ (°)	c' (kPa)
Km 660+400	SPT 01	0,5	5,00	18,00	9,00	3,33	16,67	5,50	18,33	36,80	27,50	6,73	27,00	2,15
		1,0	6,00	18,00	18,00	2,36	14,14	6,60	15,56	35,48	33,00	12,83	27,00	3,66
		2,0	4,00	18,00	36,00	1,67	6,67	4,40	7,33	30,63	22,00	21,31	27,00	2,97
		3,0	4,00	18,00	54,00	1,36	5,44	4,40	5,99	29,60	22,00	30,68	27,00	3,17
	SPT 02	1,0	2,00	18,00	18,00	2,36	4,71	2,20	5,19	28,94	11,00	9,95	25,00	1,56
		2,0	4,00	18,00	36,00	1,67	6,67	4,40	7,33	30,63	22,00	21,31	25,00	4,53
		3,0	2,00	18,00	54,00	1,36	2,72	2,20	2,99	26,79	11,00	27,27	25,00	2,08
	SPT 04	1,0	6,00	18,00	18,00	2,36	14,14	6,60	15,56	35,48	33,00	12,83	27,00	3,66
		2,0	4,00	18,00	36,00	1,67	6,67	4,40	7,33	30,63	22,00	21,31	27,00	2,97
		3,0	4,00	18,00	54,00	1,36	5,44	4,40	5,99	29,60	22,00	30,68	27,00	3,17
	SPT 05	0,5	4,00	18,00	9,00	3,33	13,33	4,40	14,67	35,03	22,00	6,31	27,00	1,72
		1,0	5,00	18,00	18,00	2,36	11,79	5,50	12,96	34,13	27,50	12,20	27,00	3,03
		2,0	7,00	18,00	36,00	1,67	11,67	7,70	12,83	34,06	38,50	24,34	27,00	5,99
	SPT 06	0,5	3,00	18,00	9,00	3,33	10,00	3,30	11,00	33,02	16,50	5,85	27,00	1,26
		1,0	4,00	18,00	18,00	2,36	9,43	4,40	10,37	32,64	22,00	11,53	27,00	2,36
		2,0	5,00	18,00	36,00	1,67	8,33	5,50	9,17	31,88	27,50	22,39	27,00	4,05
		3,0	4,00	18,00	54,00	1,36	5,44	4,40	5,99	29,60	22,00	30,68	27,00	3,17

✓ **Km 660 + 570 (Pista Sul e Norte)**

Os resultados destes parâmetros ficaram relativamente próximos com valor mínimo do ângulo de atrito 26,29°, média de 30,83° e máximo de 32,64°, já a variação dos resultados da coesão (c) é muito grande, com valores mínimos de 2,75 kPa e máximos de 17,78 kPa, o que impossibilitou utilizar um valor médio (Tabela 17). O nível freático varia de 1,3 metros no SPT-01 até 6 metros no SPT-05.

Tabela 17. Resultados dos parâmetros de resistência do km 660+570m

Local	Amostra	z (m)	Nspt	Ynat (kN/m ³)	σ'v (kPa)	Liao e Whitman, 1966				Hatanaka & Uchida, 1966		Descomposição em c' e φ		
						CN	N ₁	N ₆₀	(N ₁) ₆₀	φ (N ₁) ₆₀	Su (kPa)	τ (kPa)	φ (fixo - menor valor calculado)	c' (kPa)
Km 660+570	SPT 01	1,0	1,30	18,00	18,00	2,36	3,06	1,43	3,37	27,20	7,15	9,25	0,00	9,25
		2,0	1,40	18,00	36,00	1,67	2,33	1,54	2,57	26,29	7,70	17,78	0,00	17,78
		3,0	4,00	18,00	54,00	1,36	5,44	4,40	5,99	29,60	22,00	30,68	26,00	4,34
	SPT 02	1,0	4,00	18,00	18,00	2,36	9,43	4,40	10,37	32,64	22,00	11,53	26,00	2,75
		2,0	4,00	18,00	36,00	1,67	6,67	4,40	7,33	30,63	22,00	21,31	26,00	3,75
		3,0	4,00	18,00	54,00	1,36	5,44	4,40	5,99	29,60	22,00	30,68	26,00	4,34
	SPT 03	1,0	3,00	18,00	18,00	2,36	7,07	3,30	7,78	30,94	16,50	10,79	26,00	2,01
		2,0	3,00	18,00	36,00	1,67	5,00	3,30	5,50	29,20	16,50	20,12	26,00	2,56
		3,0	4,00	18,00	54,00	1,36	5,44	4,40	5,99	29,60	22,00	30,68	26,00	4,34
	SPT 04	1,0	4,00	18,00	18,00	2,36	9,43	4,40	10,37	32,64	22,00	11,53	26,00	2,75
		2,0	4,00	18,00	36,00	1,67	6,67	4,40	7,33	30,63	22,00	21,31	26,00	3,75
		3,0	4,00	18,00	54,00	1,36	5,44	4,40	5,99	29,60	22,00	30,68	26,00	4,34
	SPT 05	1,0	4,00	18,00	18,00	2,36	9,43	4,40	10,37	32,64	22,00	11,53	26,00	2,75
		2,0	4,00	18,00	36,00	1,67	6,67	4,40	7,33	30,63	22,00	21,31	26,00	3,75
		3,0	5,00	18,00	54,00	1,36	6,80	5,50	7,48	30,74	27,50	32,11	26,00	5,77

Depois de analisar os resultados obtidos nas sondagens dos parâmetros de resistência, optou-se por escolher o valor de 26° para ângulo de atrito e 5 kPa para a coesão. Isto baseado nos valores médios obtidos em cada parâmetro. Também porque ao serem inseridos esses valores na equação para o cálculo do fator de segurança mostrou resultados satisfatórios, com o que seria o cenário no momento que foram feitos as sondagens, zonificando uma quantidade de áreas com alta suscetibilidade a escorregamentos. Lembrando que os furos de sondagens foram feitos em lugares onde haviam ocorrido escorregamentos translacionais.

5.2.2.3 Ângulo de atrito e coesão obtidos pelas amostras indeformadas

Para este ensaio foram coletadas em quatro (04) pontos amostras indeformadas que representaram os dois tipos de solo presentes na região de estudo, solo residual e coluvionar. As coletas foram feitas em diferentes profundidades, nas amostras AI-01 e AI-04 a 1 metro de profundidade, a 1,5 metros na amostra AI-02 e 2,3 metros na amostra AI-03. Em cada ponto foi extraído um bloco de prova com dimensões de 30x30 cm.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado conforme orientação da norma britânica BS 1377 – parte 7 (1999) do British Standard Institution. Por cada bloco coletado foram talhados três corpos de prova, em anéis metálicos bisselados de seção quadrada com 100 mm de lado e 20 mm de altura, aplicou-se tensões normais de 30, 60 e 90 kPa na prensa modelo Shear Trac II, fabricada pela Geocomp, com velocidade de cisalhamento de 0,7 mm/min (Figura 41).



Figura 41. Na direita o talhado dos anéis e na esquerda a amostra AI- 02 montada na prensa.

Na Tabela 18 são apresentados os resultados do ensaio de cisalhamento direto convencional.

Tabela 18. Resultados dos parâmetros de resistência

AMOSTRA	TIPO DE SOLO	Φ (°)	C' (KPA)
AI – 01	Residual	27,6	7,11
AI – 02	Colúvio	23,1	8,88
AI – 03	Residual	35,2	9,33
AI – 04	Residual	40,1	10,18

Para o cálculo do fator de segurança (Fs) no caso das amostras indeformadas o valor da coesão escolhido foi de 8 kPa e 32° de ângulo de atrito. Baseado nos valor médio dos resultados obtidos, ao igual que nas sondagens, ao serem inseridos esses valores na equação mostraram resultados bem coerentes com o cenário atual. Para a espessura do solo foi utilizada o resultado do mapa de formas das vertentes, baseado nas características dos locais com cicatrizes observadas em campo.

6. DISCUSSÕES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões obtidas na pesquisa, iniciando com o item 6.1 Processamento e confecção dos mapas temáticos, seguido pelo item 6.2 Aplicação do método adotado e finalizando com o item 6.3 Análise dos resultados obtidos.

6.1 Processamentos dos parâmetros envolvidos na análise - confecção de mapas temáticos.

Para a obtenção dos índices de segurança na área de estudo, primeiramente foram analisados individualmente os parâmetros envolvidos na análise de estabilidade, como a declividade, a curvatura da vertente, a área de contribuição e o tipo de solo, já que são informações necessárias na aplicação da equação de Fator de Segurança (F_s), ou seja:

6.1.1 Parâmetros topográficos

Os parâmetros topográficos (declividade, perfil de curvatura e orientação das vertentes) foram derivados a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT), que é a representação digital de uma seção da superfície terrestre, dada por uma matriz de pixels com coordenadas planimétricas (x,y) e um valor de intensidade do pixel, correspondente à elevação.

Para a criação do MDT, foi utilizada a ferramenta “*Topo to Raster*”, do software *ESRI ArcGis 10* (desenvolvido por HUTCHINSON, 1989), o qual interpola valores de elevação, impondo restrições que garantam uma estrutura de drenagem conectada e a representação correta dos topos e fluxos de entrada de dados de altimetria. Para a área toda (2 km²), os dados de entrada são obtidos pela digitalização das bases topográficas a escala 1:25.000, tais como curvas de nível com equidistância a cada 10 metros, pontos cotados e a rede hidrografia. A resolução de pixel adotado no MDE foi de 10 metros, baseado na equidistância das curvas de nível. Para melhor detalhe, também foram utilizados os dados da faixa de domínio (800 m²- 200 metros para cada lado da rodovia) os dados de entrada foram obtidos pela restituição fotogramétrica a escala 1:1.000 com equidistância das

curvas de nível a cada 1 metro, utilizando a mesma lógica da base topográfica, o valor de resolução do pixel foi de um 1 metro.

O resultado do MDT utilizando as duas bases topográficas pode ser observado na Figura 42. O MDT é reclassificado em quatro classes de altitude (767- 797 m, 797- 827 m, 827- 857 m e 857- 897 m), onde é possível observar que as menores altitudes estão localizadas ao centro da região de estudo, entre 767- 797 metros e as altitudes entre 797- 827 metros são as mais representativas (aproximadamente 39 % do total da área).

O gráfico de barras inserido no MDT corresponde à porcentagem de ocorrência de cada classe (maior quantidade de pixels), mostram que apesar de existir uma tendência entre as duas escalas trabalhadas, a escala 1:25.000 tende a generalizar mais os valores dos parâmetros, em comparação com a escala 1:1000 que mostra valores mais detalhados no que diz respeito ao percentual de ocorrência de cada parâmetro. Baseado nesta citação pode-se dizer, que a base topográfica a escala 1:25.000 pode ser utilizada em estudos locais preliminares para o mapeamento da análise de estabilidade, pelo menos no que respeita na área aqui estudada, sempre que a área seja menor que 6,25 km² (ver tabela 6), como é o caso da região em estudo, onde a área de abrangência é de 2 km².

O comentário anterior pode ser aplicado em todos os mapas obtidos neste trabalho, como são os mapas temáticos de declividade, perfil das vertentes e de direção das vertentes, assim como nos resultados dos mapas de Fator de Segurança (Fs), onde também foram inseridos os gráficos de barras, de modo de comparar os resultados obtidos em ambas as escalas gráficas, resultando numa moderada diferença nos valores de ocorrência.

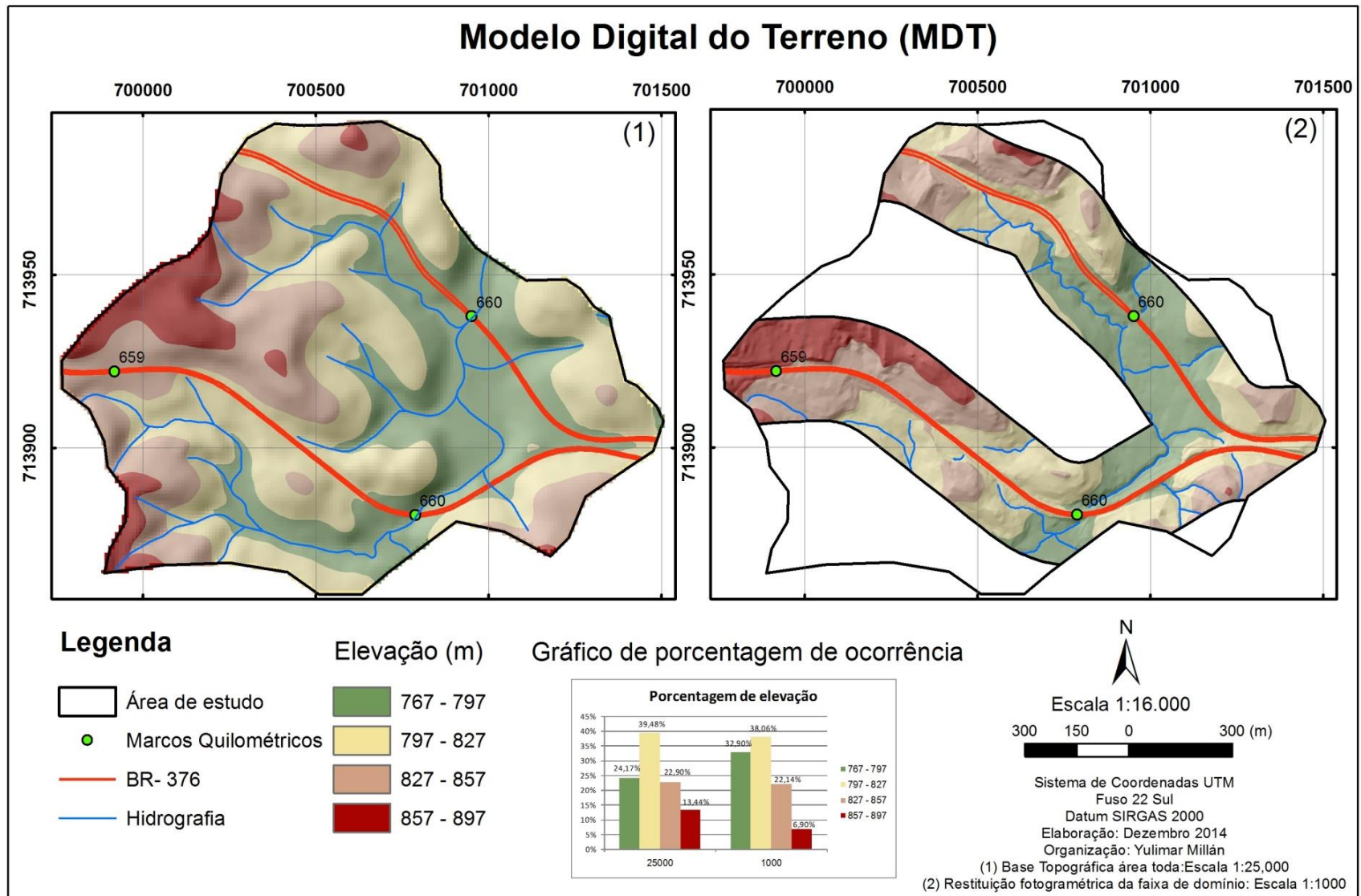


Figura 42. Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de estudo, à esquerda base topográfica a escala 1:25.000 da área toda (2 km²) e à direita base topográfica a escala 1:1000 da faixa de domínio (800 m²).

a) Declividade

A declividade é um dos principais fatores na avaliação da suscetibilidade, este parâmetro descreve a inclinação da superfície terrestre em relação ao plano horizontal, e pode ser obtida em graus ou porcentagem.

O mapa da declividade da área de estudo foi elaborado utilizando a ferramenta "*Slope*", e reclassificado em seis classes de declividade em porcentagem, seguindo a proposta de EMBRAPA (2006). Na Tabela 19 é apresentada a classificação do relevo de acordo com a declividade das vertentes, os valores das classes em porcentagem são levados a graus, para serem usados na equação do fator de segurança.

Tabela 19. Classificação do relevo de acordo com a declividade, adotando intervalos em graus segundo os intervalos da EMBRAPA para classificação de solos. FONTE: Adaptado de EMBRAPA (2006).

CLASSES DE DECLIVIDADE		CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO
(%)	(°)	
0 - 3	0 - 1,35	plano
3 - 8	1,35 - 3,60	suave ondulado
8 - 20	3,60 - 9,00	ondulado
20 - 45	9,00 - 20,25	forte ondulado
45 - 75	20,25 - 33,75	montanhoso
> 75	> 33,75	escarpado

Ao analisar o mapa de declividade na Figura 43, pode-se observar que os intervalos com maior ocorrência na área de estudo foram as classe de 9 - 20,25° e de 20,25 - 33,75° de declividade, alcançando 42 e 25 % de ocorrência respectivamente, onde o relevo no primeiro intervalo é classificado como forte ondulado e no segundo como montanhoso. As maiores declividades > 33,75° ocorrem em apenas um 4% da área, mais especificamente ao sudeste da região, onde o relevo é classificado como escarpado. Estas observações podem ser vistas no gráfico inserido no mapa de declividade, que mostra os valores predominantes para cada classe de declive em ambas as bases topográficas (escala 1:25.000 e 1:1.000). Os locais com valores de maior declividade ao serem comparados com o mapa de inventário de escorregamentos coincidem com os locais onde já ocorreram escorregamentos em anos anteriores (ver figura 21).

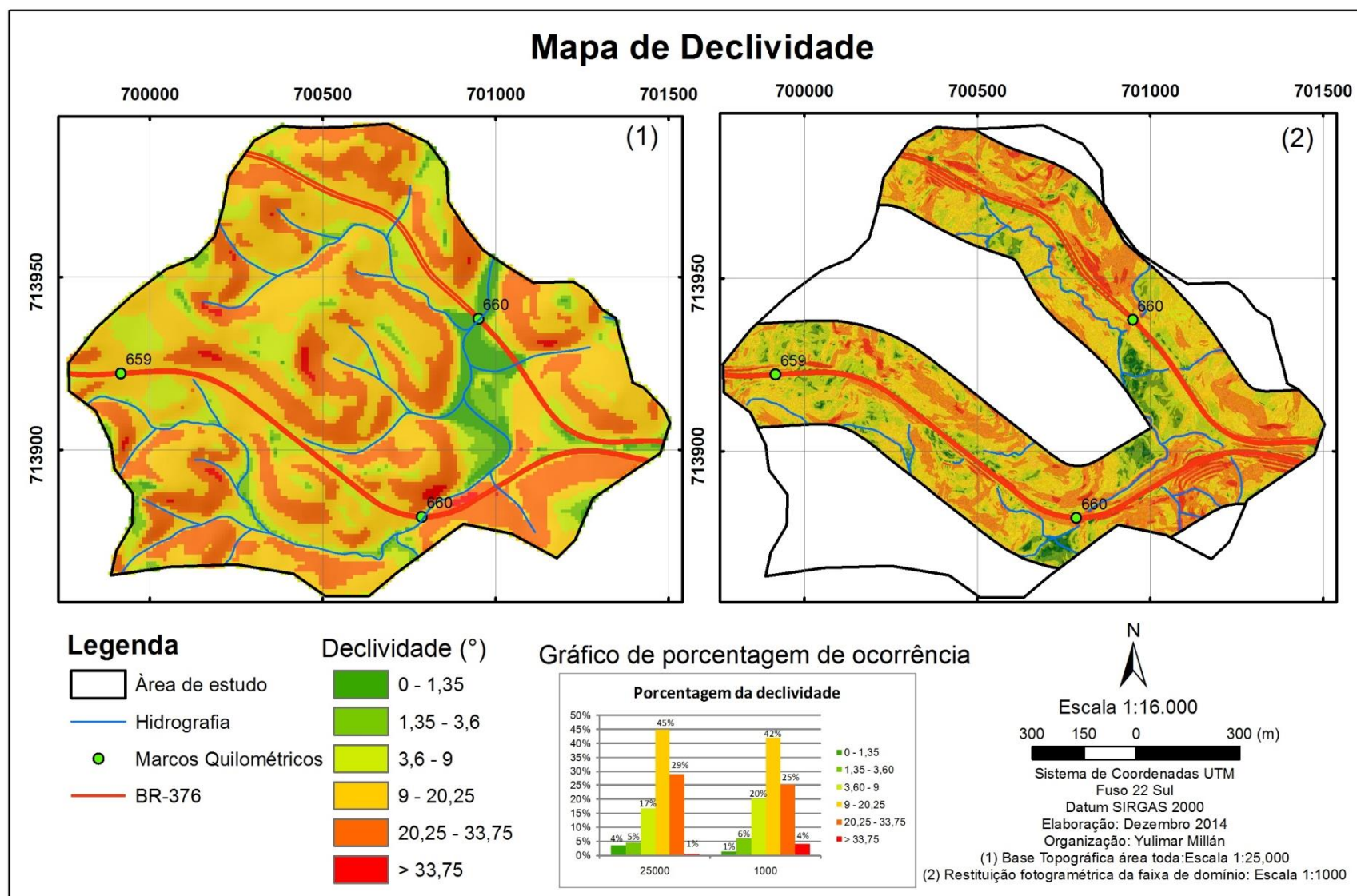


Figura 43. Mapa de Declividade da área de estudo, à esquerda base topográfica a escala 1:25.000 da área toda (2 km²) e à direita base topográfica a escala 1:1000 da faixa de domínio (800 m²).

b) Curvatura de Vertentes

A curvatura de uma vertente apresenta o grau de concavidade ou convexidade de uma vertente, longitudinal e transversalmente. O mapa de curvatura é gerado a partir da ferramenta “*Curvature*”, onde se calcula o perfil de curvatura das vertentes em cada célula do grid. Este atributo topográfico refere à forma da vertente, e é importante para caracterizar a concentração e mudanças na velocidade do fluxo de água e processos relacionados ao transporte de sedimentos.

Cada curva de relevo positiva indica que a superfície do terreno está tendendo à convexidade e o fluxo desloca-se de forma divergente; uma curva negativa indica que a superfície está tendendo à concavidade e o fluxo desloca-se de forma convergente, originando a concentração da umidade pela entrada de água; um valor de zero indica que a superfície é retilínea. O método de curvatura da superfície utilizado pelo ArcGis é baseado em ZEVEBERGEN e THORNE (1987).

Segundo AUGUSTO FILHO *et al.* (1988), as encostas retilíneas são associadas à menor profundidade do solo, enquanto as encostas côncavas são associadas a solos de espessura mediana. As encostas convexas são ligadas a solos de maior espessura, ou mais profundas. Baseado nesta citação e nas observações de campo foi atribuído uma espessura do solo de 3 metros em áreas que apresentam vertentes convexas, 1 metro em vertentes côncavas e 0,5 metros em vertentes retilíneas.

Analisando os valores do mapa de curvatura em perfil, verifica-se que 48% da área apresentam-se com forma convexa, 47 % forma côncava e 5% da área é retilínea (Figura 44). Ao comparar o mapa de Perfil de Curvatura com o mapa de inventário de escorregamentos (ver Figura 21), é possível observar que as maiorias dos escorregamentos ocorreram em áreas onde a forma da curvatura é convexa e ocorrem os maiores valores de declividade, entre 20,25° e 33,75°.

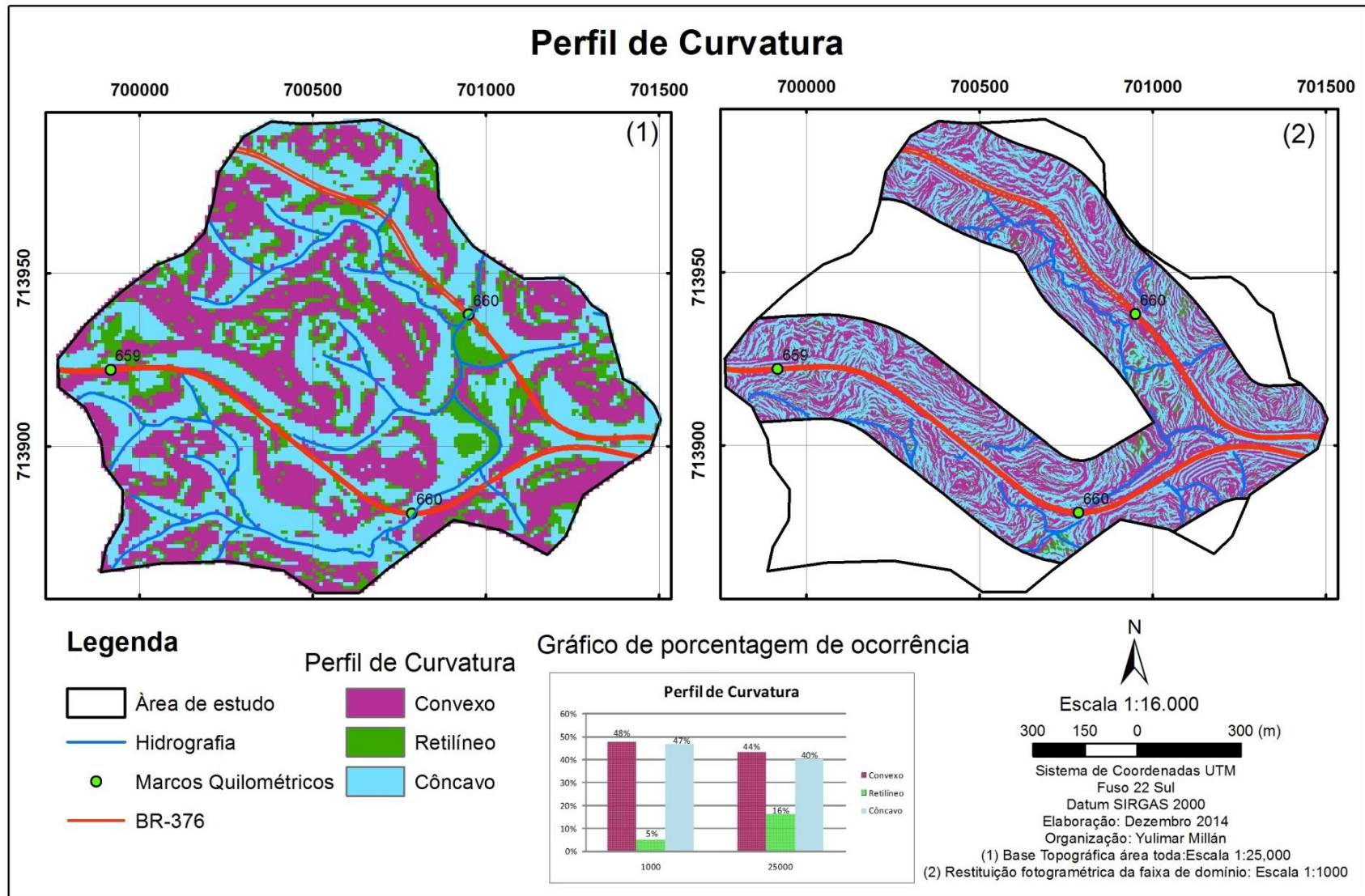


Figura 44. Mapa de Perfil de Curvatura das vertentes na área de estudo, à esquerda base topográfica à escala 1:25.000 da área toda (2 km²) e à direita base topográfica a escala 1:1000 da faixa de domínio (800 m²).

c) Orientação de Vertentes

A orientação das vertentes é gerada através da ferramenta “Aspect”, a qual identifica a direção de máxima declividade de cada célula com seu vizinho. Os valores de cada célula do grid gerado é a direção de bússola do aspecto. A orientação das vertentes fornece informações sobre as vertentes que se encontram mais expostas às variáveis climatológicas, como por exemplo, a direção do vento e a insolação (KOZCIAK, 2005). A quantidade de chuva será maior nas encostas mais expostas a estes eventos atmosféricos.

No gráfico de barras inserido no mapa de orientação das vertentes, são descritas oito (08) classes geradas da divisão de 360° entre oito. Estas classes correspondem aos pontos cardeais e colaterais: Norte (337,5 – 22,5 °); Nordeste (22,5 – 67,5°); Leste (67,5- 112,5); Sudeste (112,5 – 157,5); Sul (157,5 – 200,5); Sudoeste (202,5 – 247,5); Oeste (247,5 – 292,5) e Noroeste (292,5 – 337,5).

A partir da análise do gráfico de porcentagem de ocorrência da orientação das vertentes inserido no mapa, pode-se observar a orientação das vertentes com maior porcentagem de representatividade são as orientadas ao Norte com 23%; ao Leste com 15% e ao Sul e Nordeste com 13%, as outras orientações apresentam-se bastante homogêneas. As vertentes com orientação para o Sul e Noroeste são as que apresentam a maior ocorrência de escorregamentos na área de estudo (Figura 45).

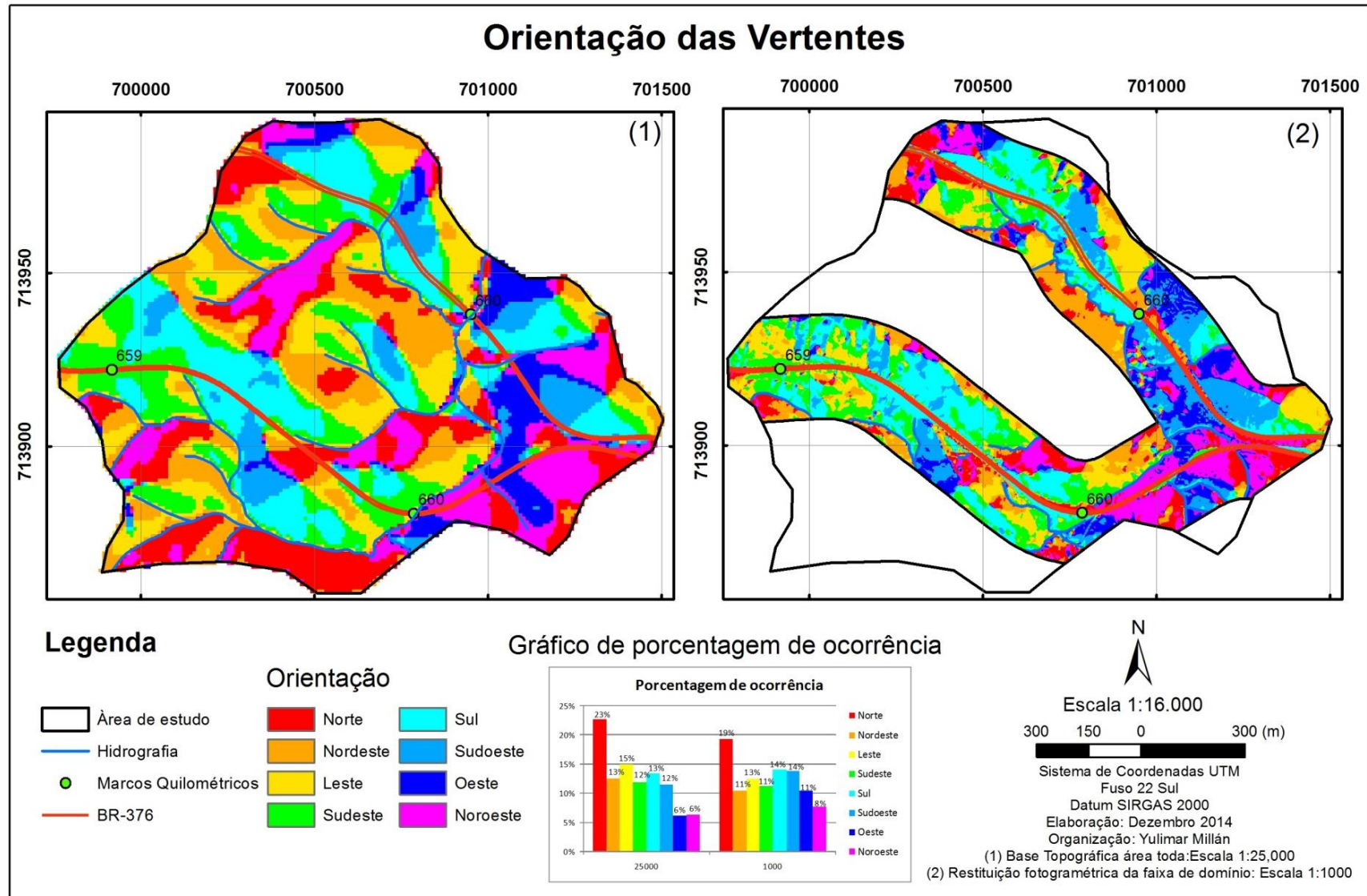


Figura 45. Mapa de Orientação das Vertentes, à esquerda base topográfica a escala 1:25.000 da área toda (2 km²) e à direita base topográfica a escala 1:1000 da faixa de domínio (800 m²).

d) Índice de Posição Topográfica (IPT)

Este atributo topográfico foi utilizado para a elaboração do mapa preliminar de solos. Para processar o índice de posição topográfica utilizou-se um raster obtido através do processamento do MDE com a ferramenta “Focal Statistics”, localizada no “ArcToolbox”, “Spatial Analyst Tools”, “Neighborhood”. Uma vez obtido o raster utilizou-se deste no algoritmo proposto por Weiss (2001) para mensurar a diferença entre a elevação de um ponto central (Z_0) e a média da elevação (Z) ao seu redor com um raio predeterminado (R).

$$IPT = Z_0 - \bar{Z}$$

Para realizar esta operação se utiliza o “Raster Calculator” localizado na barra de ferramentas do “Spatial Analyst”, escrevendo a equação e selecionando para sua operação os raster do MDE e aquele obtido através do “Focal Statistics”.

Foi utilizada para o cálculo do índice a vizinhança a avaliação altitudinais de média de entorno a partir de um anel, definido por um raio interno e outro externo que se estendem para fora da célula central para a obtenção do cálculo do IPT.

Embora outras formas de vizinhança possam ser adotadas, o anel mostrou melhor resultado. As dimensões internas foram definidas com o valor de 10 pixels e a externa com o valor de 13 pixels, valores que melhor se adaptaram a morfologia do relevo da área de estudo.

Os valores positivos obtidos pelo IPT representam locais que estão em posições mais elevadas que a média do seu entorno, sendo geralmente associados a litologias mais resistentes aos processos denudacionais, que denotam posições superiores das vertentes onde estão situados os solos residuais, de desenvolvimento autóctone.

Os valores negativos, por sua vez, representam os locais mais rebaixados em relação à sua vizinhança, caracterizando o terço inferior de vertentes e fundos de vale, locais onde há acumulação de material alóctone na formação pedogenética, dando origem a solos coluvionares ou transportados.

Os valores próximos de zero, representam as superfícies de declive constante, destacando-se áreas planas. A Figura 46 descreve o resultado para o mapa de solos empregando o IPT.

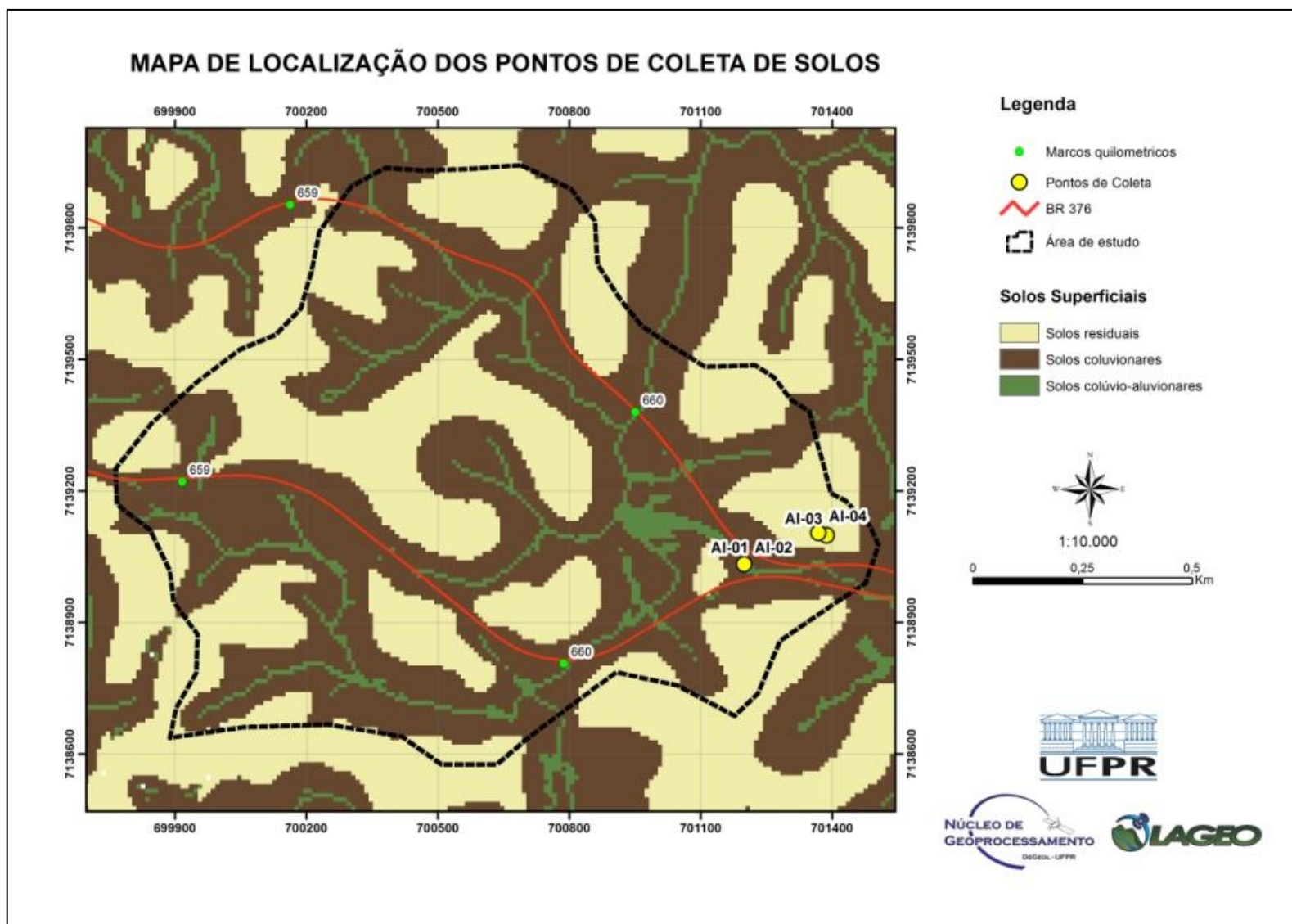


Figura 46. Mapa preliminar de solos, obtido utilizando a ferramenta do IPT com a locação das amostras indeformadas. Base topográfica a escala 1:25.000.

Baseado no modelo de ocorrência do IPT e apoiado no mapa geológico e visitas de campo à área de estudo, foi possível indicar e mapear a distribuição dos solos, em 2 classes predominantes: 1) Solos residuais gnáissicos – migmatíticos e 2) solos coluvionares ou transportados e em menor proporção os solos colúvio-aluvionares. O conjunto de classes resultou no mapa preliminar de solos apresentado na figura anterior.

6.1.2 Parâmetros mecânicos

Estes parâmetros foram diretamente obtidos dos ensaios de laboratório feitos as quatro (04) amostras indeformadas coletadas. Assim, obtiveram-se os valores de resistência dos solos, tais como ângulo de atrito, onde os valores utilizados na equação será 26° e 32° ; a coesão de 5 kPa e 8 kPa (Sondagem e amostras indeformadas). A espessura do solo ($h=3, 1$ e $0,5$ metros) foi determinada pelo mapa de perfil de curvatura e pelas observações diretamente no local, sendo identificada como característica intrínseca do movimento de vertente. O peso específico natural do solo (γ_{nat}) foi de 18 g/cm^3 e da água (γ_a) de 10 kN/m^3 estes valores amostrais dos ensaios foram extrapolados para toda a área.

6.2 Aplicações do método para a determinação dos mapas de fator de segurança (Fs).

Uma vez consideradas as variáveis atuantes no processo de estabilidade de vertentes e dos solos, e baseados nos modelos matemáticos referente à equação 5, podem-se simular vários cenários que resultam em diferentes mapas de fator de segurança, variando o porcentagem de saturação, em primeiro lugar considerando o solo seco e logo considerando que o solo encontra-se saturado em um 30%.

A equação 5 fornece o valor de fator de segurança de um talude de extensão infinita, levando em consideração os parâmetros da cobertura vegetal, a declividade da vertente e dos parâmetros de resistência dos solos, tais como ângulo de atrito e coesão.

$$F_s = \frac{Cs + \left[(\gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \tan \phi}{(h \gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}} \quad \text{Equação 5}$$

Quanto aos parâmetros que contemplam a influência da vegetação e o vento, foram adotados valores fixos para toda a região, com base nos valores médios abordados em estudos preliminares, sendo que para a Serra do Mar os valores de σ_a são da ordem de 5,0 kPa (WOLLE e PEDROSA, 1981) e os valores de σ_{ve} são da ordem de 1,0 kPa (FENDRICH e FERREIRA, 1995).

Para os cálculos do Fs a ferramenta utilizada foi o “Raster Calculator” presente no software ArcGis 10.1 (ESRI, 2012), com esta ferramenta foi possível o cálculo de equações aplicadas a grids espacializadas, gerando como resultados mapas onde cada pixel representa o resultado de uma equação.

A equação do cálculo do fator de segurança foi traduzida para a linguagem aceita na ferramenta, resultando na seguinte equação:

$$FS = \frac{("coesão" + ("gamanat - 1") * "espessura" * \cos("inclinação" * (\pi / 180.0)) + \sigma_a * \cos("inclinação" * (\pi / 180.0))) * \tan("phi" * (\pi / 180.0))}{(("espessura" * "gamanat + \sigma_a") * \sin("inclinação" * (\pi / 180.0)) + Fve)}$$

Ao inserir os dados de cada parâmetro foi possível a criação de um mapa de fator de segurança, ou seja, um mapa que descreve a suscetibilidade de uma determinada região ante a ocorrência de escorregamentos translacionais, baseado nos cálculos desta variável, com valores de referencia baseados no próprio fator de segurança (FIORI e CARMIGNANI, 2009). O modelo matemático resultou em valores de FS discretizadas em quatro classes, onde:

O valor $FS < 1$ representa muito alta suscetibilidade a escorregamentos;

O valor de $FS = 1$, – 1,5 representa alta suscetibilidade a escorregamentos;

O valor de $FS=1,5-2$ representa moderada suscetibilidade a escorregamentos;

O valor de $FS > 2$ representa baixa suscetibilidade a escorregamentos.

Considerou-se neste trabalho que os locais com valores de segurança inferiores a $Fs < 1,5$ representam as áreas de alta suscetibilidade, áreas de maior instabilidade na região. Este valor é considerado uma margem de segurança pela DNER (Departamento de Estradas e Rodagem) para cortes de taludes em estradas, após KOSCIAK (2005).

Os mapas obtidos pelas simulações feitas através da Equação 5 podem ser observados nas Figuras 47 até a 50.

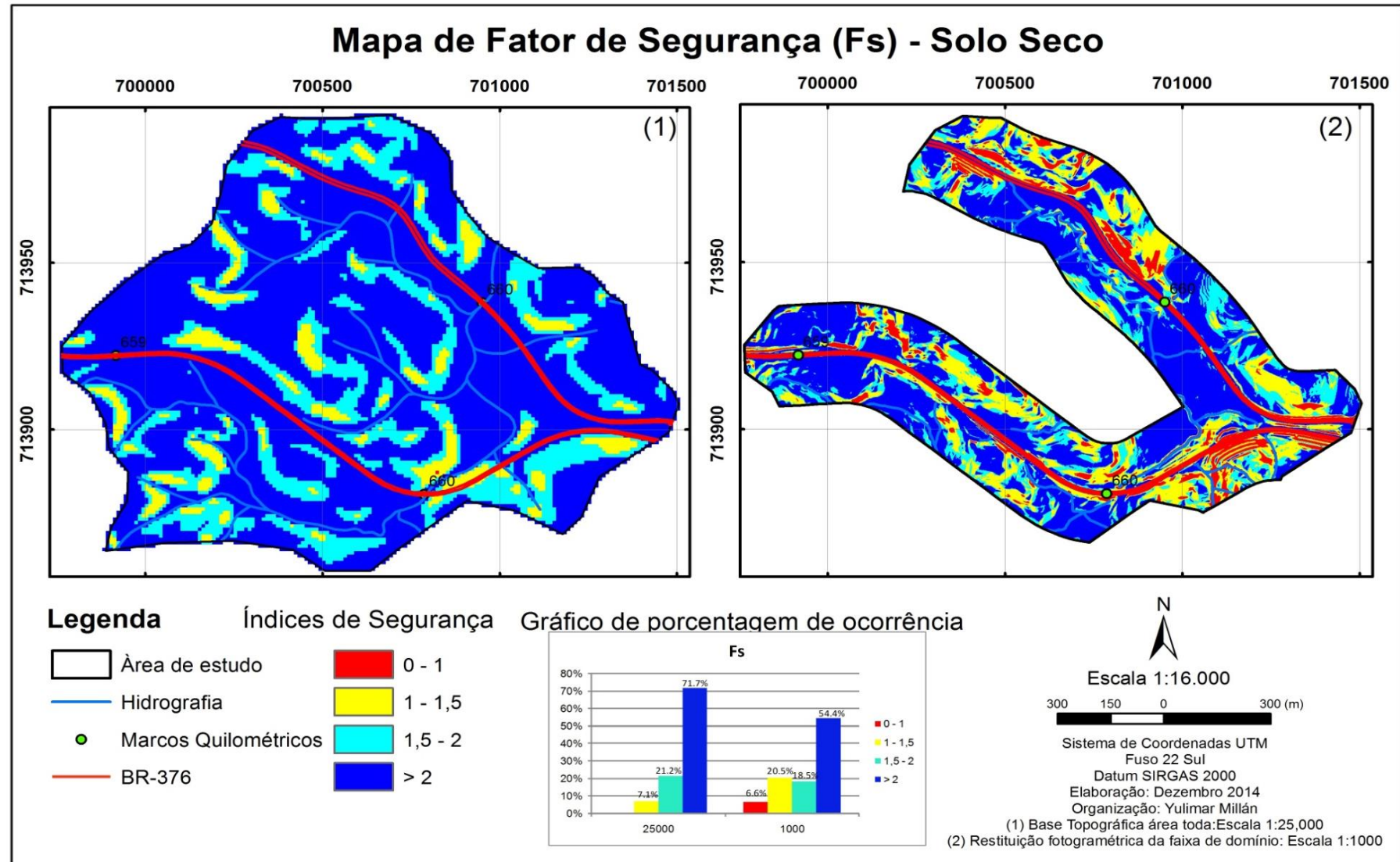


Figura 47. Mapa de Fator de Segurança – Solo Seco, baseado nos valores obtidos nas sondagens ($C=5$ kPa e $\phi=26^\circ$), à esquerda base topográfica a escala 1:25.000 da área toda (2 km²) e à direita base topográfica a escala 1:1000 da faixa de domínio (800 m²)

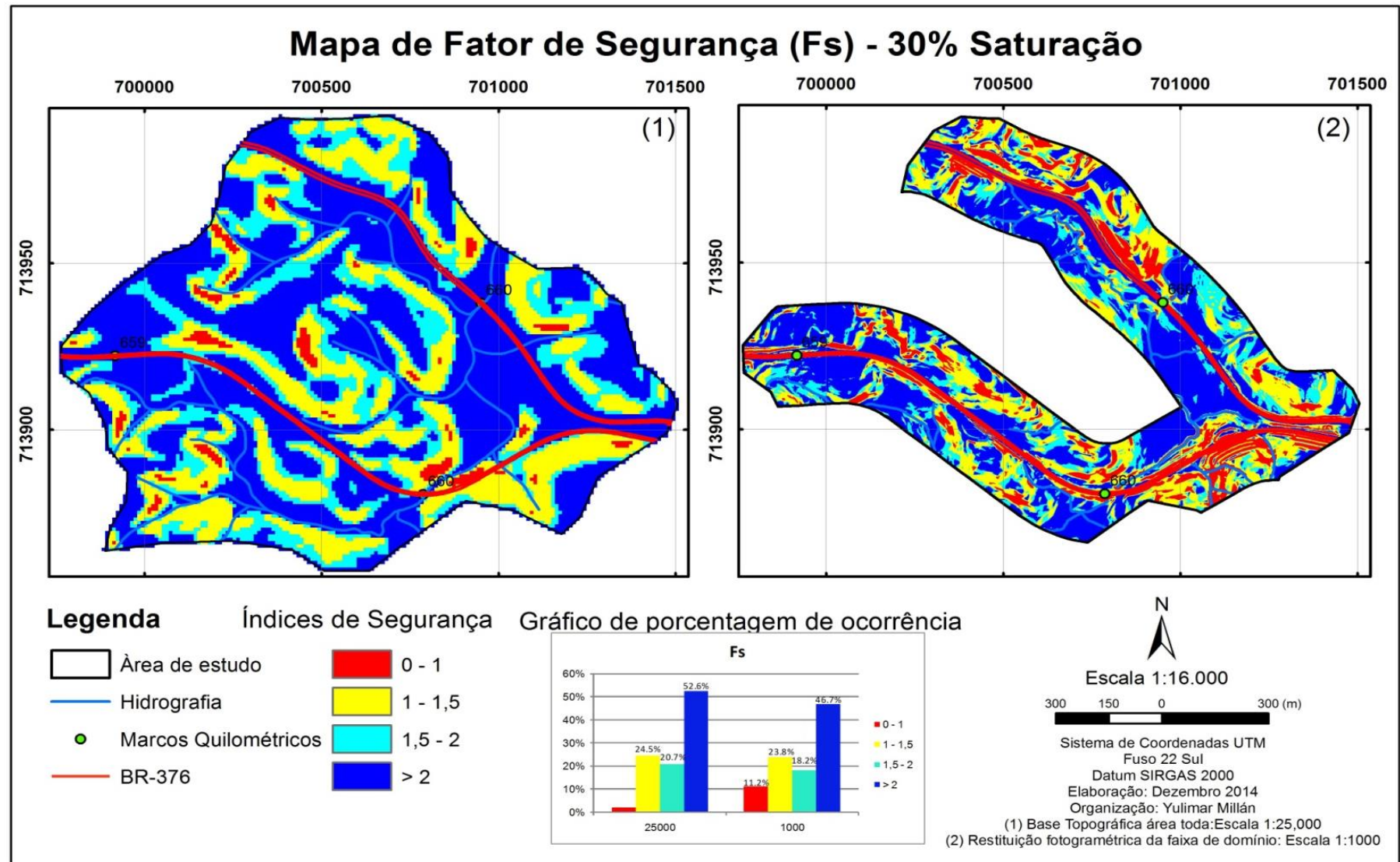


Figura 48. Mapa de Fator de Segurança — 30% de saturação baseado nos valores obtidos nas sondagens ($C=5$ kPa e $\phi=26$), à esquerda base topográfica a escala 1:25.000 da área toda (2 km²) e à direita base topográfica a escala 1:1000 da faixa de domínio (800 m²)

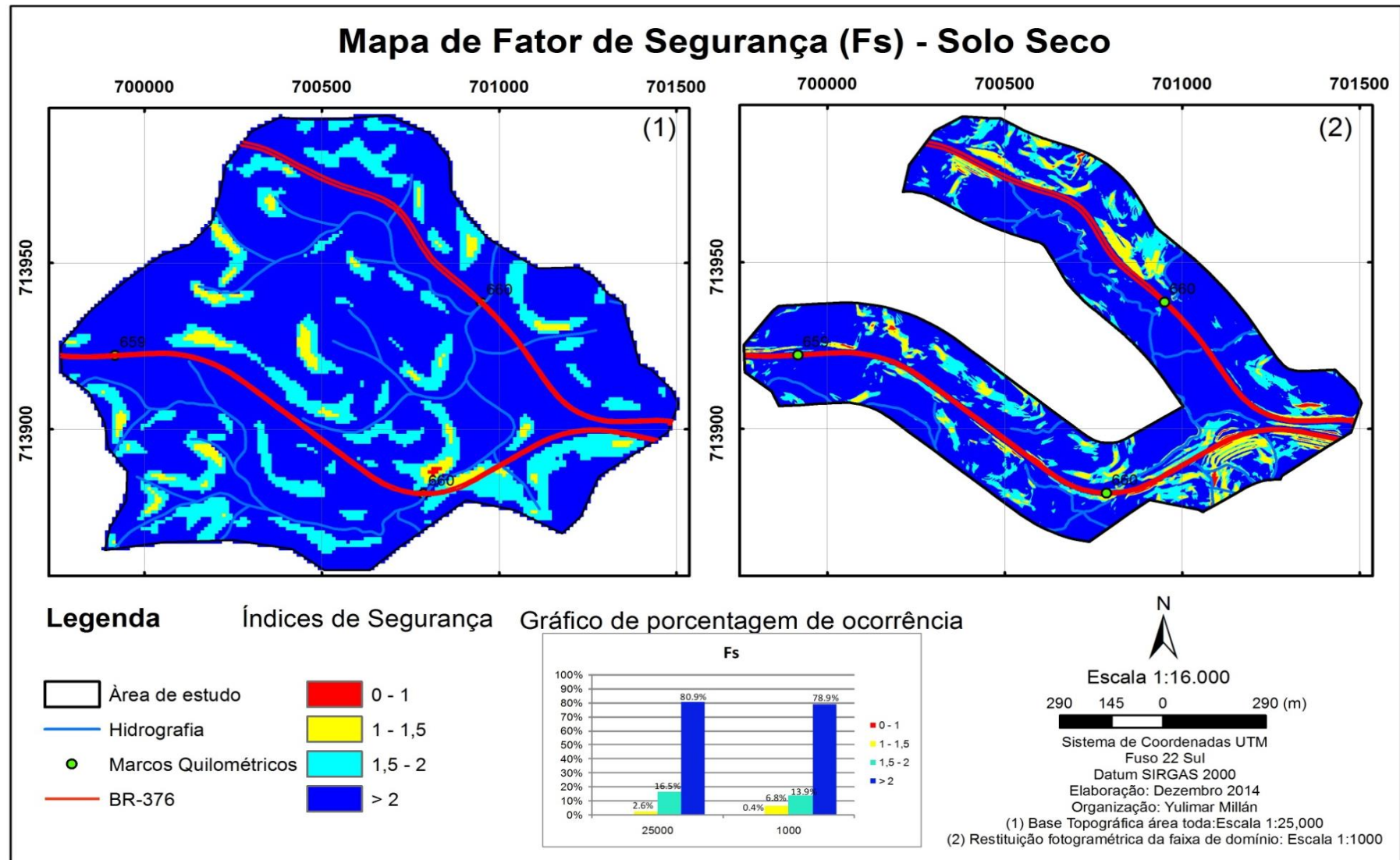


Figura 49. Mapa de Fator de Segurança – Solo Seco baseado nos valores obtidos nas amostras indeformadas ($C=8$ kPa e $\phi=32^\circ$).

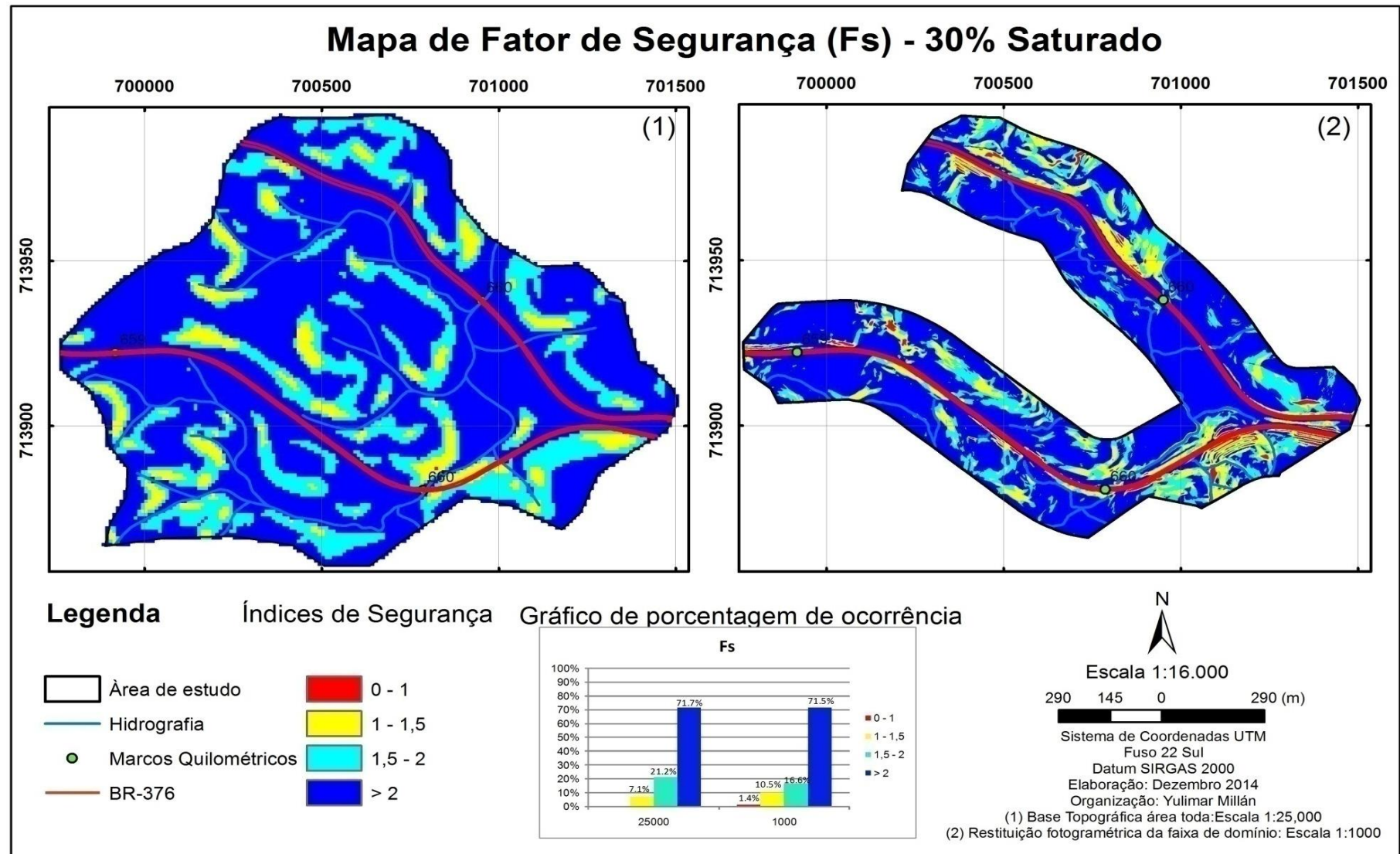


Figura 50. Mapa de Fator de Segurança — 30% de saturação baseado nos valores obtidos nas amostras indeformadas ($C=8$ kPa e $\phi= 35$)

6.3 Análises dos resultados

Os primeiros cenários (Figuras 47 e 48) correspondem aos resultados dos mapas de (Fs) utilizando os parâmetros de resistência obtidos das sondagens, $c=5$ kPa e $\phi=26^\circ$ na equação 5. Quando é considerado o solo seco (escala 1:1000) é possível observar nos gráficos de barras inseridos nos mapas que o 54,4 % da área apresenta baixa suscetibilidade ante a ocorrência de escorregamentos translacionais, 18,5 % suscetibilidade moderada, 20,5 % apresenta alta suscetibilidade e o 6,6 % restante muita alta suscetibilidade. Quando é considerada a saturação do solo em 30% as áreas de baixa suscetibilidade diminuem para 46,7%, as de moderada estabilidade se mantiveram em 18%, as áreas de alta e muita alta suscetibilidade aumentam para 23,8 % e 11,26 % respectivamente.

Já nas Figuras 49 e 50 correspondentes aos mapas de Fs utilizando os parâmetros de resistência obtidos nas amostras indeformadas ($c=8$ kPa e $\phi= 32^\circ$), quando é considerado o cenário em solo seco a área apresenta 78,9 % de baixa suscetibilidade ante a ocorrência de escorregamentos translacionais, 13,9 % suscetibilidade moderada e apenas um 6,8 % alta suscetibilidade. Quando é considerada a saturação do solo em 30% as áreas de baixa suscetibilidade diminuem para 71,5%, as de moderada suscetibilidade aumentam para 16,6%, as de alta suscetibilidade aumentam para 10,5 % e as de muita alta suscetibilidade o 1,4 % restante.

Nos mapas de Fs gerados observa-se claramente o aumento das áreas com alta suscetibilidade à medida que na equação 15 é variada a porcentagem de saturação do solo. À medida que vai aumentando a saturação do solo, após eventos de chuvas intensas, ocorre uma diminuição da resistência do solo à erosão.

Em quanto à inclinação do terreno, as áreas com valores de índice de segurança superiores a $F_s > 1,5$ coincidem com valores de declividades baixas onde o perigo de ocorrência de movimentos de massa é praticamente nulo. Estas áreas correspondem a setores com declividades inferiores a $20,25^\circ$. Áreas instáveis coincidem com declividades acima de $20,25^\circ$, estes valores de declividade potencializam a atuação da força da gravidade sobre a vertente, diminuindo a resistência ao cisalhamento do solo. Isto pode ser observado na Figura 51, correspondente à relação dos valores obtidos no mapa de declividade com o mapa de Fator de Segurança.

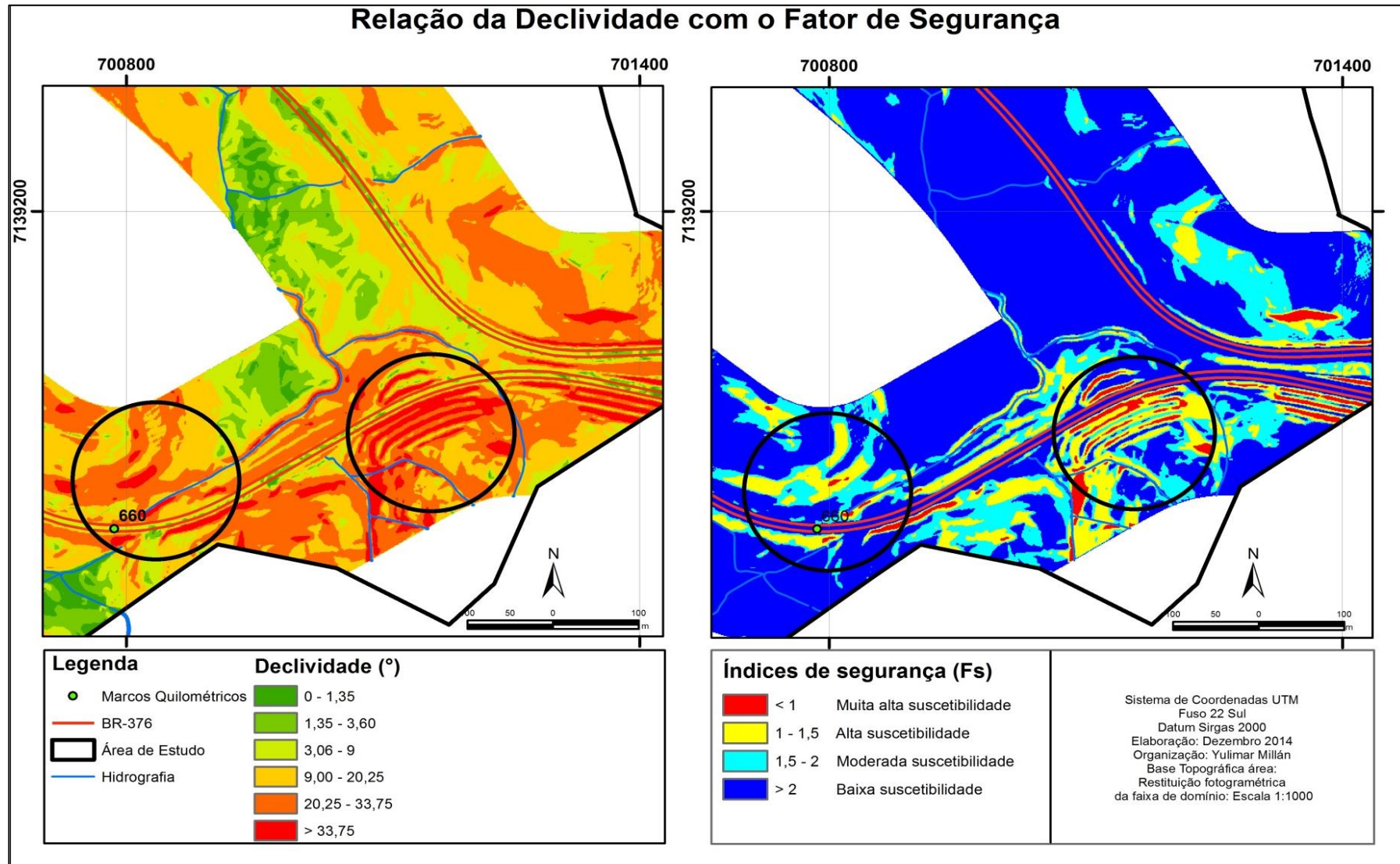


Figura 51. Relação da Declividade com o mapa de Fator de Segurança (amostras indeformadas-30% saturação) na porção sudeste da área em estudo, faixa de domínio a escala 1:1.000.

A forma das encostas é outro fator que influencia na estabilidade de uma determinada área, já que este parâmetro está associado diretamente com a espessura do solo. As vertentes convexas devido a seu relevo positivo são ligadas a solos de maior espessura, enquanto que as vertentes côncavas e retilíneas estão associadas respectivamente a solos de mediana e baixa espessura. Como pode-ser observado na Figura 52 as vertentes convexas encontram-se na área de estudo, principalmente nas áreas de baixa e mediana vertente, relacionadas as mais altas declividades e aos menores valores de índice de segurança ($F_s < 1,5$ ver mapa anterior), ou seja, áreas instáveis. As vertentes côncavas e retilíneas por sua vez, estão relacionadas aos menores valores de declividades ($< 20^\circ$) e maiores índices de segurança ($F_s > 1,5$) setorizando as áreas de maior estabilidade, onde a ocorrência de escorregamentos translacionais é praticamente nula.

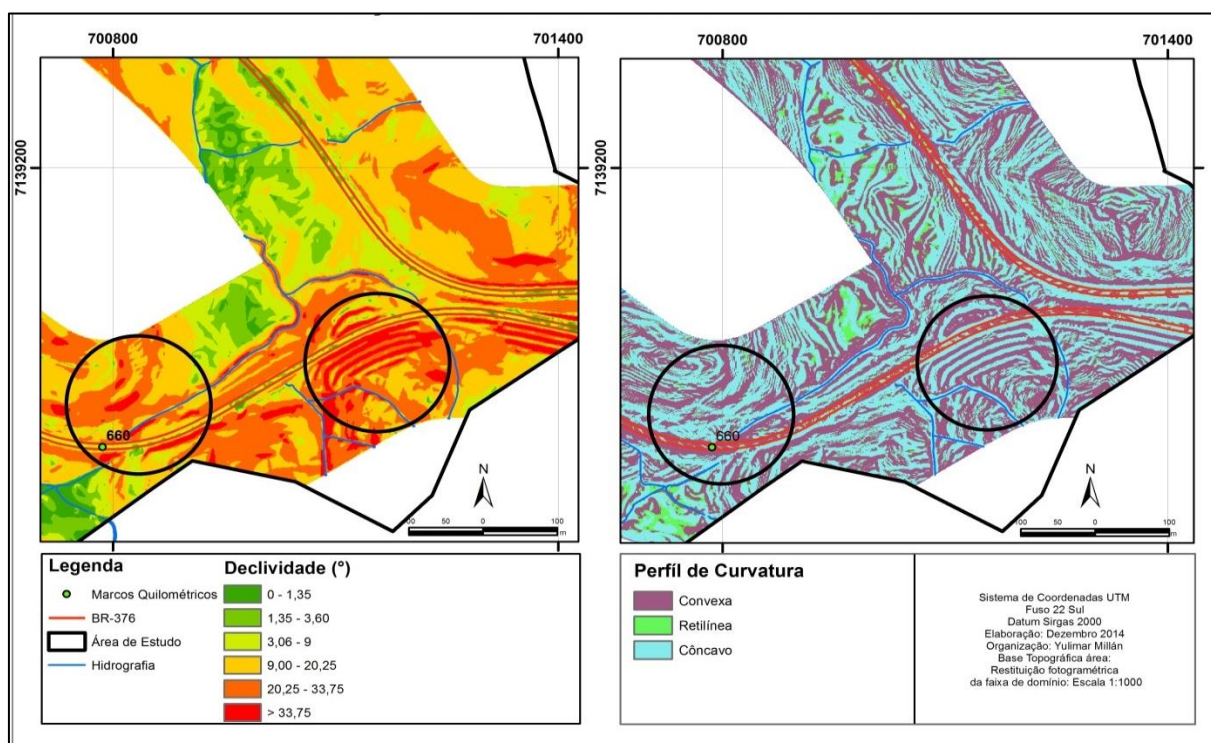


Figura 52. Relação da Declividade com o Perfil de Curvatura na porção Sudeste da área em estudo, utilizando a base topográfica a escala 1:1.000.

6.3.1 Validação do mapa de fator de segurança

Para realizar a validação dos mapas Fator de Seguranças (Fs) obtidos através dos parâmetros de resistência das sondagens e as amostras indeformadas e da análise dos mapas temáticos, estes mapas foram comparados com o inventário de escorregamentos realizado. Os mapas de Fs escolhidos para a validação foram os que representam a faixa de domínio nos cenários de 30 % de saturação, em primeiro lugar pelo fato de apresentar melhor detalhe na localização das áreas afetadas, e no caso do valor da saturação porque este mostra o pior cenário na localização de áreas instáveis obtido na análise da suscetibilidade.

Nas Figuras 53 e 54 é possível observar que aproximadamente o 90% dos escorregamentos translacionais e cicatrizes observadas ocorreram nas áreas com índices de segurança inferiores a 1.5 ($F_s < 1,5$), ou seja, em áreas que vão de alta suscetibilidade até muita alta suscetibilidade ante a ocorrência de escorregamentos translacionais no mapa de Fator de Segurança (Fs).

As fotos representativas inseridas nos mapas correspondem no caso das fotos R1 e R3 aos locais onde foram executados anteriormente obras de retaludamentos, na foto R2 pode-se observar a cortina atirantada feita para a proteção da vertente e na foto C1 observam-se as evidências de movimentações recentes através da cicatriz fotografada.

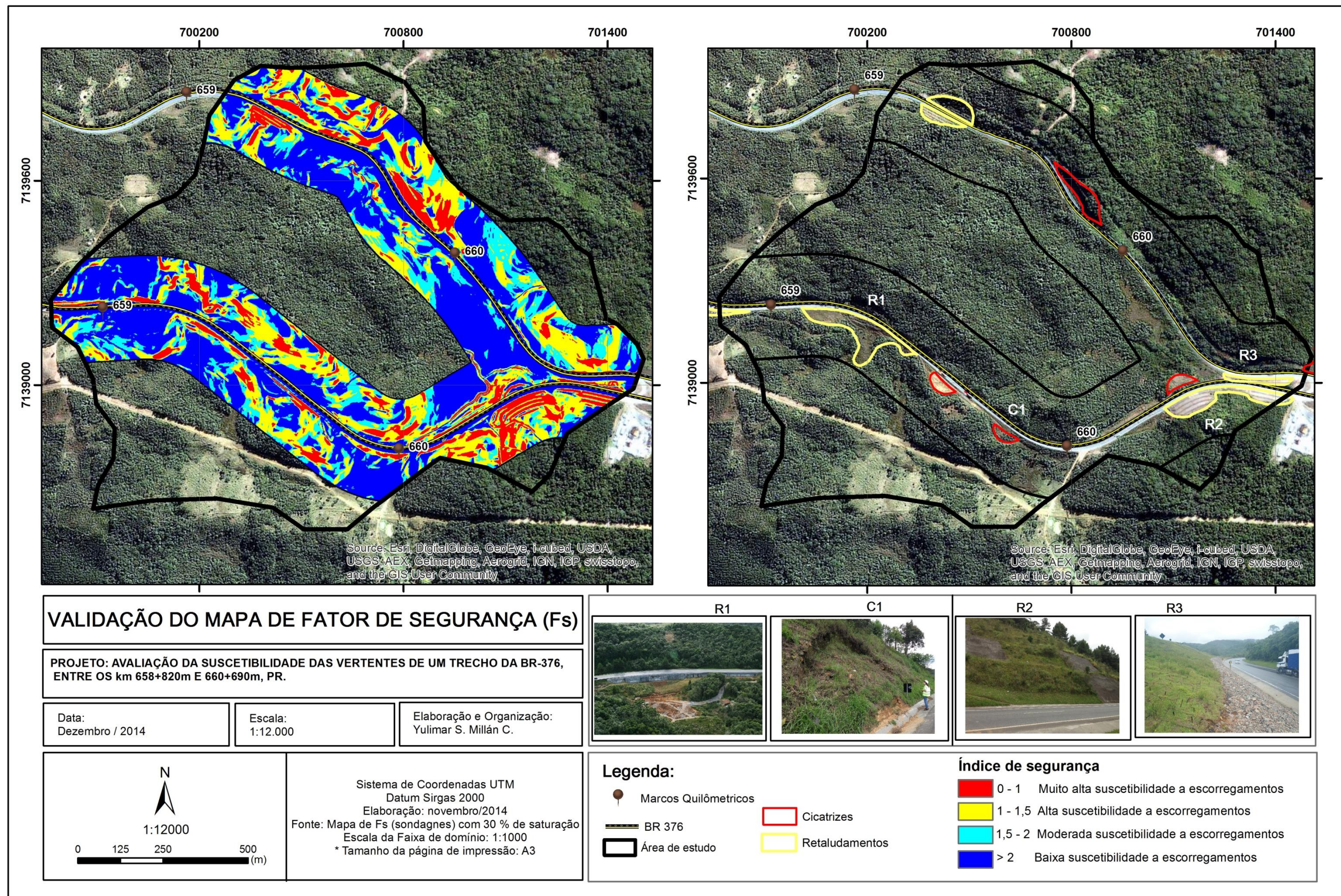
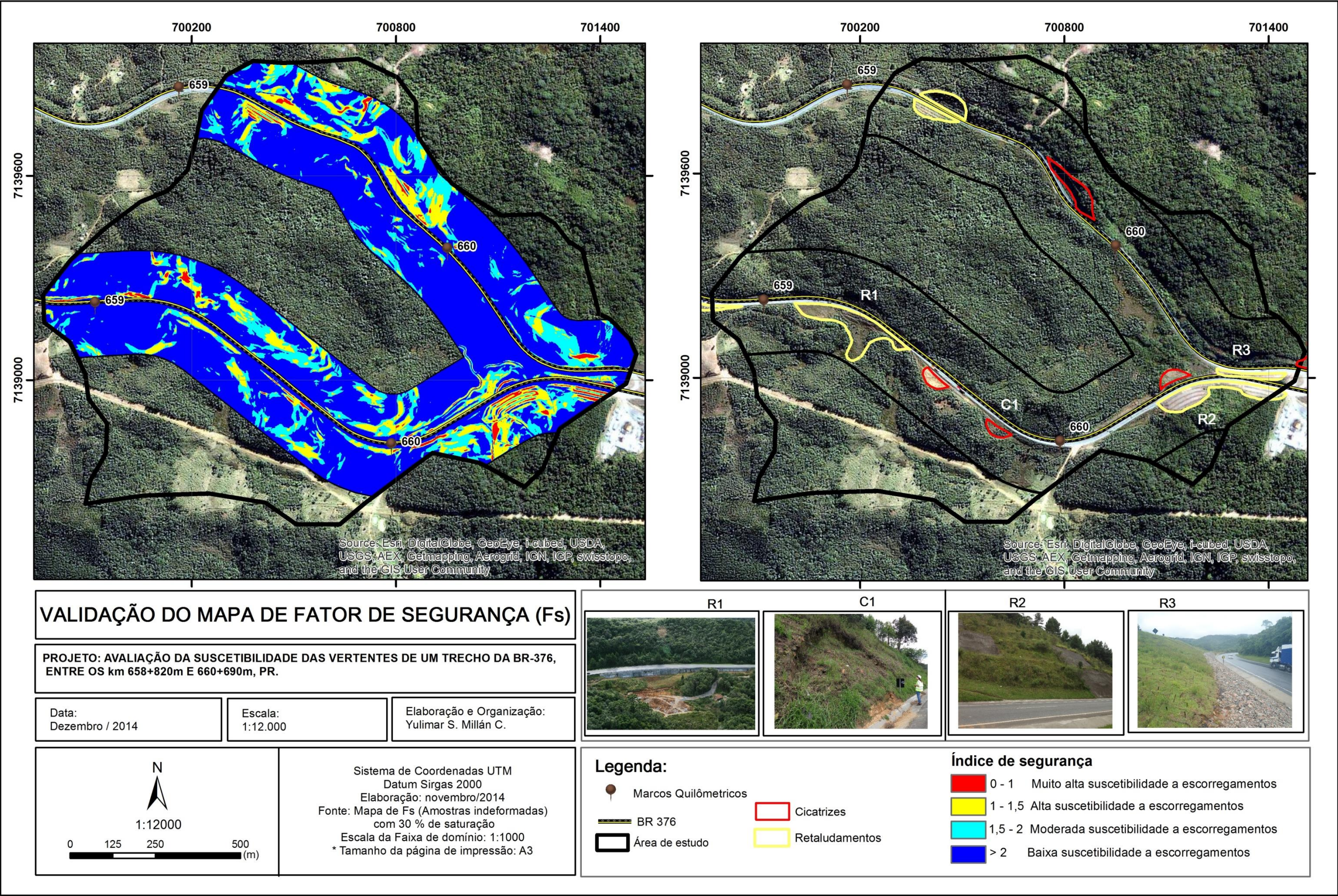


Figura 53. Validação do Mapa de Fator de Segurança (Fs) – 30% de saturação (dados das sondagens) com o mapa de Inventários de Escorregamentos



7. CONCLUSÕES

O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitiu a geração de um banco de dados georeferenciados, com os quais foi possível caracterizar as condicionantes atuantes na deflagração dos escorregamentos, como a declividade das vertentes e a espessura do solo, possibilitando a elaboração do modelo matemático para o cálculo do fator de segurança.

A construção de um Modelo Digital do Terreno confiável permitiu a construção de mapas temáticos (declividade, formas e orientação das vertentes e solos) consistentes com as características topográficas da região em estudo, minimizando os erros na análise de suscetibilidade, obtendo-se uma boa correspondência na localização das áreas onde se verificou a ocorrência de escorregamentos translacionais.

Os fatores topográficos, especialmente a declividade e a curvatura das vertentes são de grande importância no estudo do comportamento hidrológico do terreno, pois determinam o padrão de distribuição e concentração de água no solo.

A espessura do solo é um parâmetro importante na análise de estabilidade de vertentes. As vertentes convexas, devido à maior espessura do solo acumulado apresentam-se mais instáveis que as côncavas e as retilíneas, ou seja, nas áreas onde o perfil de curvatura é convexo foi onde se verificou a maioria dos escorregamentos translacionais.

Os ensaios de caracterização feitos em laboratório nos tipos solos na área de estudo, ou seja, solos residuais (produto da decomposição de migmatito-gnaíssico) e solos coluvionares (transportados pela gravidade), permitiram sua classificação como siltes arenosos de baixa compressibilidade e plasticidade.

Os parâmetros físicos e de resistência dos solos foram obtidos pela análise das planilhas de sondagem SPT e por ensaios de laboratório feitos em amostras indeformadas, coletadas em campo. O valor determinado para o ângulo de atrito interno e a coesão nas sondagens foi de 26° e 5 kPa respectivamente. Já nas amostras indeformadas os valores foram 32° para o ângulo de atrito interno e 8 kPa para a coesão.

Os escorregamentos ocorreram principalmente nas encostas de perfil de curvatura convexas e côncavas, com valores da declividade acima de $20,25^\circ$, muitas vezes relacionados com os diques existentes na área, conforme se observou na fotointerpretação. A relação vem dada principalmente pelo tipo do material geológico presente na região, como é o complexo gnáissico-migmatítico.

Em relação à orientação, as vertentes com maior quantidade de escorregamentos translacionais foram as vertentes orientadas ao norte, leste, sul e nordeste, em decorrência de estarem mais expostas às condições climáticas.

Os mapas de Fator de Segurança (Fs) obtidos permitem uma visualização das vertentes com maior suscetibilidade ante a ocorrência de escorregamentos translacionais, mostrando que as áreas instáveis aumentam à medida que aumenta a saturação do solo

Os gráficos de barras inseridos em todos os mapas, mostram que apesar de existir uma tendência entre as duas escalas trabalhadas, a escala 1:25000 tende a generalizar mais os valores dos parâmetros estudados, em comparação com escala 1:1000 que mostra valores mais detalhados no que diz respeito ao percentual de ocorrência de cada parâmetro.

Pode-se concluir que a metodologia empregada na criação do modelo matemático para o cálculo de Fs apoiado no uso de SIG, mostrou-se satisfatória na identificação das áreas mais suscetíveis à ocorrência de escorregamentos translacionais, mostrando uma excelente correspondência com os eventos já ocorridos no local de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984)– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – Determinação de Limite de Liquidez. Rio de Janeiro.
- ABNT (1995)– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro.
- ABNT (1995)– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 6508: Solos – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro.
- ABNT (1986) – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 6457: Solo – Preparação para Amostras de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro.
- ABNT (1984) – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação de Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro.
- ABNT (1984)– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro.
- ABNT (1986)– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2009) – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de Taludes. Rio de Janeiro.
- ANTT (2012). AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES *Relatório Técnico do Projeto de Estabilização de Taludes, trechos 659+270, 659+300, 660+570 e 660+400.*, Curitiba. (Relatório inédito)
- AMARAL, C. (2003). *Grau de estabilidade das vertentes da Serra do Purunã nas proximidades do falso túnel*, Curitiba. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.
- AMARAL JR., A.F (2007). Mapeamento geotécnico aplicado a análise de processos de movimentos de massa gravitacionais: Costa Verde, RJ a escala 1:10.000. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. (1998) *Estabilidade de Taludes*. In: Oliveira, A.M.S. e Brito.; S.N.A. (eds) Geologia de Engenharia. ABGE, São Paulo: 243-269.
- BISPO, P. C.; ALMEIDA, C. M.; VALERIANO, M. M.; MEDEIROS, J. S.; CREPANI, E. (2011). *Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião com o uso de métodos de inferência espacial*. UNESP. Geociências, v 30, n,3 , p. 467- 478.

BONUCCELLI, T. J (1999). *Estudo dos movimentos gravitacionais de massa e processos erosivos com aplicação na área urbana de Ouro Preto, MG a escala 1:10.000*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 497 p.

BORCHARDT, N (2005). *Diagnóstico geológico-geotécnico na estabilidade de encostas do alto e médio curso da bacia do rio Sagrado*. Curitiba. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

CHORLEY, R.J.; SHUMM, S. A.; SUGDEN, D. E. (1984). *Geomorphology*. Cambridge: Methuen, 600 p.

CHOWDHURY, R.N. (1978). *Slope Analysis*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 423 p.

DUNN, I. S.; ANDERSON, L. R.; KIEFER, F. W(1980). *Fundamentals of geotechnical analysis*. New York: John Wiley & Sons, 414 p.

DIKAU, R. (1990). *Derivatites from detailed geoscientific maps usig computer methods*. Zeitschrift fur Geomorphologic, v. 2, n. 80, p. 45-55.

EMBRAPA (2006). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, DF.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. (1996). *Movimentos de massa, uma abordagem geológico-geomorfológica*. In: Guerra, A. J. T; Cunha, S. B. (Ed) *Geomorfologia e meio ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil,. Cap. 3, p.123-194.

FERNADES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, B.R.;GRIMBERG, H. (2001). *Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis*. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.2, n.1, p.51-71.

FIORI, A.P (1995)a. *Estudo da estabilidade de vertentes da área de Guaraqueçaba, Paraná*. Boletim Paranaense de Geociências, v. 43, p. 25-40.

FIORI, A. P (1995)b. *Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas*. Boletim Paranaense de Geociência, v. 43, p. 7-24,.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L (2009). *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Aplicação na estabilidade de taludes*. 2ª edição. Editora da UFPR, Oficina de Textos, 602p.

FIORI, A. P.; NUNES, F. G (2003). *Áreas de risco e dinâmica geoambiental das encostas da Serra do Mar – PR*. Boletim Paranaense de Geociências, v. 53, p. 45-58.

FREITAS, A (2009). *Estudo de previsão de escorregamento a partir do fator de segurança 3D: Campos do Jordão, SP*. Dissertação (Mestrado em Geotécnica). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

FRENDRICH, R. & FERREIRA, M. A (1995). Rosa de frequência dos ventos no Estado do Paraná. *Revista acadêmica da PUC/PR*, 11, p.49-57.

FUCK, R. A (1967)a. *Geologia da folha de Piraquar*. Curitiba, Comissão da carta geológica do Paraná, 37p. (Relatório inédito).

FUCK, R. A (1967)b. *Geologia da folha de São José dos Pinhais*. Curitiba, Comissão da carta geológica do Paraná, 46p. (Relatório inédito).

FUCK, R. A (1967)c. *Geologia da folha Abapã*. Curitiba, Boletim da Universidade Federal do Paraná, Geologia, v.25, p.1-34.

FUCK, R. A.; MARINI, O.J; TREIN, E (1967)a. *Geologia e petrografia dos migmatitos do Paraná*. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, n.23-25, p. 5-41.

FUCK, R. A.; TREIN, E.; MURARORI, A.; RIVEREAU, I.C. (1969)a. *Mapa geológico preliminar do litoral, da Serra do Mar e parte do Primeiro Planalto do Estado do Paraná*. Boletim Paranaense de Geociências, v.27, p.123 -152.

GERSCOVICH, D. M (2012). *Estabilidade de Taudes*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 159.

GIRARDI, G (1999). *Análise preliminar da estabilidade de encostas e taludes de Almirante Tamandaré e Colombo*. Curitiba,. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

GIUDICINI, G., NIEBLE, C. M. *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. Editorial Edgard Blucher. 2ª edição. São Paulo, 1984.

HATANAKA, M.; UCHIDA, A. *Soils and Foundations*. Japanese Geotechnical Society. Vol.36, n.4, 1-9, Dez, 1996.

HUTCHINSON, J. N. (1988) General report: *morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology*. 5th International Symposium on Landslides, Lausanne:3-35.

ITCG - Instituto de Terras, Cartografia e Cartas Topográficas 2857-4-NE e 2858-3-NO. Escala 1:25.000, Projeto Pró-Atlântica, 2002.

KOZCIAK, S (2005). *Análise da estabilidade de vertentes na bacia do rio Marumbi - Serra do Mar - Paraná*. Curitiba,. Tese (Doutorado em Geologia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

LIAO, S.S.C.; WITHMAN, R.V. *Averburden Correction Factors for SPT in Sand*. In *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 112, n.3, p 373-377, 1986.

MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ S/A. *Mapa Geológico, Folha de Curitiba*. Paraná: MINEROPAR, 2005. Escala: 1:250.000, colorido.

MINEROPAR (2005) - MINERAIS DO PARANÁ S/A. *Mapa Geomorfológico, Folha de Curitiba*. Paraná a escala: 1:250.000, colorido.

MINEROPAR (2004). *A Mineração na região Metropolitana de Curitiba*, convênio DNPM, Capítulo 2.

MOREIRA, C. V.R., PIRES NETO, A. G (1998). *Clima e Relevo*. Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Editorial Oficina de Textos. São Paulo.

NUNES, F. G (2002). *Levantamento de áreas de riscos a partir da dinâmica geoambiental das encostas da Serra do Mar no Paraná*. Curitiba, Dissertação (Mestrado em Geologia) –Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

O'LOUGHLIN, C. L (1984). *Effectiveness of induced forest vegetation for protecting against landslides and erosion in New Zealand's steep lands*. Paper presented to Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability, Honolulu, Hawaii.

RIB, H.T., LIANG, T. *Recognition and identification In: Landslides and Engineering Practice*. E. B. Eckel (ed). Special Report n29, Highway Research Board, p. 34-80.

SEMA (2002). *Mapeamento da Floresta Atlântica do Estado do Paraná – Carta de vegetação: folha Pedra branca do Araraquara SG.22-X-D-V-3 (MI-2858-3)*, escala 1:50.000 Curitiba, Secretária do Estado do Meio Ambiente e dos recursos hídricos de Paraná.

SAFAEI, M., OMAR, H., HUAT, B. K., YOUSOF, Z. B. M., GHIASI, V (2011). *Deterministic Rainfall Indiced Landslide approaches, Advantage and Limitation*. EJGRI, vol 16, p. 1619-1650.

SEMA (2002). *Mapeamento da Floresta Atlântica do Estado do Paraná*. Curitiba, Secretária do Estado do Meio Ambiente e dos recursos hídricos de Paraná, p.40.

SESTINI, M.F. (1999). *Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba, SP utilizando Imagens TM-Landsat e SIG*. São José dos Campos. 140 p. (INPE-7511-TDI/724). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

SIGA Jr, O.; BASEI, M.A.; NETO, J. M.; MACHIAVELLI, A.; HARARA, O. M (1995). *O complexo Atuba: um cinturão Paleoproterozóico intensamente retrabalhado no Neoproterozóico*. Bol. IG – USP, Sér. Cient., 26:69-98.

SLIDE, R.C., PEARCE, A.J e O'LOUGHLIN, C.L. *Hillslope Stability and Land Use*. American Geophysical Union. Washington DC. 140 p.

SCHANAID, F (2000). *Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo. Oficina de Textos, 189 p.

SOETERS, R., VAN WESTEN, C.J (1996). *Slope Instability Recognition, Analysis, and zonation*. In: TURNER, A. K; SCHUTER, R. *Landslides – investigation and mitigation*,. Editors, National Academy Press, Washington, D.C., Special Report 247, Transportation Research Board, p 129-177,.

SOUZA, M. L (1996). *Mapeamento Geotécnico da cidade de Ouro Preto, MG (escala 1:10.000), Susceptibilidade aos Movimentos de Massa e Processos correlatos*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

STROUD, M.A (1989). *The Standard Penetration Test-ITS Application and Interpretation*. Proc.I.C.E.Conf.on Penetration Testing. Inglaterra, Londres. Thomas Telford,.

STYCZEN, M. E.; MORGAN, R. P. C (1995). *Engineering properties of vegetation*. Edited by Morgan, R. P. C. e Rickson, R. J. London: E & FN SPON, 274p. Cap. 2, p. 2 -58.

SVCS (2012) – Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. Mapa Simplificado dos Solos de Paraná, Escala 1:600.000,.

TABALIPA, N.L (2008). *Mapeamento geoambiental do Município de Pato Branco, Paraná, como ferramenta para o planejamento territorial e ambiental*. Curitiba, Tese (Doutorado em Geologia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

TEIXEIRA, M. A (2012). *Avaliação da suscetibilidade á ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais. Utilização de modelos matemáticos de base física na bacia de Tibo, Arcos de Valdevez, Portugal*. Dissertação (Mestrado em Sistemas de informação Geográfica e ordenamento do Território) - Faculdade de Letras, Universidade do Porto.

TERZAGHI, K. (1953) *Mecanismo dos escorregamentos de terra*. Instituto de pesquisas Tecnológicas de São Paulo, separata nº467, tradução de Ernesto picheler, 30p. Mechanism of landslides: in paige, S., Chairman, Applications or geology in engineering practice: Geol. Soc. America Berkey Volume, p. 83-123,1950.

VARNES, D. J. (1978) *Slope movements: types and processes – landslides analysis and control*. Washington: National Academy of Sciences, p. 11-13.

WOLLE, C. M.; PEDROSA, J. A. B (1981). *Horizontes de transição condicionam mecanismo de instabilização de encosta na Serra do Mar*. In: Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, 3, Itapema , SC. v.2, p. 121-135.

ZUQUETTE, L. V (1984). *Análise Crítica da Cartografia geotécnica e Proposta Metodológica papa as Condições Brasileiras*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

ZUQUETTE, L. V.; PEJON, O. J.; GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A. B. (1995). *Considerações básicas sobre a elaboração de cartas de zoneamento de eventos perigosos e riscos associados*. Geociências, v. 14, n.2, p.9-39.